

博士論文

フライアッシュその他の鉱物質微粉末を混入した再生
骨材コンクリートの強度増加に影響を及ぼすフィラー
効果とポゾラン反応に関する研究

平成 28 年(2016 年)9 月

徳島大学大学院 先端技術科学教育部
知的力学システム工学専攻

学生 青井洋視

博士論文

フライアッシュその他の鉱物質微粉末を混入した再生骨材コンクリートの強度増加に影響を及ぼすフィラー効果とポゾラン反応に関する研究

目次

第 1 章	序論	
1	研究の背景	1
1.1	コンクリートの骨材問題	1
1.2	フライアッシュの利用	2
1.3	既往の研究	3
1.4	研究の目的	21
1.5	本論文の構成	22
	参考文献	23
第 2 章	再生骨材とフライアッシュ	
2.1	再生骨材とは	25
2.1.1	再生骨材の品質規格(JIS 規格)	25
(a)	コンクリート用再生骨材H	26
(b)	コンクリート用再生骨材M	26
(c)	コンクリート用再生骨材L	26
2.1.2	再生骨材を用いた再生骨材コンクリート	27
(a)	再生骨材Mを用いた再生骨材コンクリート	27
(b)	再生骨材Lを用いた再生骨材コンクリート	27
2.2	フライアッシュとは	28
2.2.1	フライアッシュの生い立ちについて	28
2.2.2	石炭の物性	29
2.2.3	用途による分類	30
2.2.4	形状(粒度)による分類	30
2.2.5	石炭灰の発生と有効利用	30
2.3	2 章のまとめ	32
	参考文献	32

第3章	再生骨材モルタルの初期から長期材齢までの強度発現に影響を及ぼす 鋳物質微粉末のフィラー効果に関する一考察	
3.1	はじめに	33
3.2	再生骨材微粉末を用いた実験	33
3.2.1	使用材料	34
3.2.2	配合	34
3.2.3	モルタルの練混ぜおよび供試体の作成	36
3.2.4	試験項目	36
(1)	圧縮強度試験	36
(2)	示差熱重量分析	36
3.2.5	実験結果および考察	36
(1)	圧縮強度試験	36
(2)	示差熱重量分析	37
3.3	6種類の鋳物質微粉末を用いた実験	38
3.3.1	使用材料	39
(1)	セメントおよび鋳物質微粉末	39
(2)	細骨材	39
3.3.2	配合	40
3.3.3	モルタルの練り混ぜおよび供試体の作成	41
3.3.4	試験項目	41
3.3.5	圧縮強度試験結果および考察	41
(1)	再生骨材モルタルの置換率 10%	41
(2)	再生骨材モルタルの置換率 20%	42
(3)	再生骨材モルタルの置換率 30%	42
(4)	普通骨材モルタルの置換率 20%	43
3.3.6	強度増加率による考察	43
(1)	再生骨材モルタルの置換率 20%	44
(2)	普通骨材モルタルの置換率 20%	44
(3)	強度増加率の相関	45
3.4	第3章のまとめ	46
	参考文献	47

第 4 章	鉍物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現 メカニズムに関する一考察	
4.1	はじめに	48
4.2	実験概要	48
4.2.1	使用材料	48
(1)	セメントおよび鉍物質微粉末	48
(2)	細骨材	49
4.2.2	配合	50
4.2.3	試験項目	51
(1)	圧縮強度試験	51
(2)	示差熱重量分析	51
(3)	細孔径分布測定	51
4.3	実験結果および考察	51
4.3.1	圧縮強度	51
4.3.2	強度増加率の相関	53
4.3.3	示差熱重量分析	55
4.3.4	細孔径分布	57
4.4	第 4 章のまとめ	59
	参考文献	60
第 5 章	結 語	61

謝辞

学位論文

フライアッシュその他の鉱物質微粉末を混入した再生骨材コンクリートの強度増加に影響を及ぼすフィラー効果とポズラン反応に関する研究

第1章 序論

1 研究の背景

1.1 コンクリートの骨材問題

現代の社会環境においては、コンクリートを利用した構造物の多さは計り知れない。他のどの材料と比較しても、群を抜いている。

しかし、反面強固そうな外見に似合わず、そのコンクリートの寿命が以外と短く、粘土・石材・木材等とは比べるまでもないくらい寿命が短い。

そのコンクリートを利用した社会環境やインフラの再構築に向かって、現代は進行しつつある。

また、コンクリート業界においてもエコやリサイクルが重視されはじめ資源循環に注目し、さらには温暖化対策として炭酸ガス排出削減への取り組みも検討されている。このCO₂排出の割合は、セメント1トンにつき750kg前後にもなる^{注1-1)}。これの主な原因は、セメントの原料炭酸カルシウムCaCO₃そのものにある。 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

その社会インフラ等の再構築に向かって、避けては通れない廃コンクリートの「量」である。

コンクリートを構成している材料の約7割は天然の石材である砂利と砂である。この砂利と砂の寿命は長いので、コンクリートから分離し、再利用しようという研究は以前からおこなわれている。特に、深刻な現状は「砂」の入手である。いままでは、無尽蔵とまでいわれてきた良質でサイズの揃った海砂までも採取が禁止され、天然の「砂」の入手が困難になってきた。このようにコンクリートの骨材資源を確保する環境は極めて厳しい状況になってきた。

「重量機械」の発達と大容量の使用を可能にした「電力」により、砕石・砕砂が安価に入手できるようになったものの、依然として廃コンクリートの量は増大しつつある。

この廃コンクリートの解決方法の1つに、再生骨材をコンクリート骨材として利用する方法がある。しかしながら、再生骨材コンクリートに関する研究は、再生骨材のJIS規格の制定が最近である。

したがって、再生骨材コンクリートを実用化するための技術的課題が残されているのが現状である。

1.2 フライアッシュの利用

時代は日進月歩で移り変わり、人々の生活環境になくてはならないものに「電気」がある。江戸時代中期、平賀源内(1728 - 1780) が 1776 年、摩擦起電器・静電気発生器いわゆる「エレキテル」を修復・再現からわずか 240 年という短い期間で、世界を動かす「電力量」となった。静電気とは、摩擦起電器とあるように、摩擦により「発生」し、その電気を「コンデンサー」に蓄え、瞬時に放電する。静電気とは、この「瞬時」に放電するだけで、後続のエネルギーはない。カミナリ(雷)や膨らんだ風船が「瞬時」に破裂するのと同じで、連続したエネルギーとはならない。

それから約 100 年後、イギリスの科学者ファラデー(1791 - 1867) が電磁誘導法則と呼ばれる「コイル」から発生する「起電力」を発見した。この電気には連続性があり、たとえば、水道管を移動している水、また谷や川を流れている水で、「仕事」ができるのに似ている。

電気の製造にはファラデーの法則以外には、太陽光発電か燃料電池の方法しかない。化学的発電方法であるこの二つはまだまだ微々たるもので、多くはファラデーの法則による磁石とコイルに頼っている。この方法による発電にはいずれも多大なエネルギーを必要とし、そのエネルギー源は、化石燃料か水力に頼るのか、あるいは「原子力」なのか。現在日本においては、石油・石炭の化石燃料か水力発電かの二つに分かれている。原子力発電については現在日本では鹿児島県・川内においての発電が唯一である。この原子力発電については別の機会に採りあげることとし、今回は石炭火力発電について詳述する。石炭による発電には、(基本的には石油でも原子力でも同じであるが) 石炭を燃焼し、多量の水蒸気を発生させ、タービン「羽根車」を回し、同軸上の磁石とコイルを作用させるのである。何気なく使用している電気だが、水力発電ならタービンを回転させるのに落差が 200 メートルも必要とされている。このエネルギーを「石炭」を燃焼させて行うのである。当然「石炭灰」が大量に出る。その石炭灰のなかの一種類がフライアッシュとして名目上は副産物として産出されている。

このフライアッシュをダムコンクリート用混和材として有効利用しようとする研究は古くから行われている。しかしながら、一般のコンクリート構造物への利用は決して多くない。これまで、フライアッシュコンクリートは特殊コンクリートの 1 つという考えが一般的であった。

したがって、フライアッシュを通常のコンクリート用混和材料として使用する場合の技術的課題が多くある。

1.3 既往の研究

第3章以降では、再生骨材モルタルにフライアッシュのほか、水硬性のない鉱物質微粉末等々を混入し、各種要因や材齢によってどのような強度発現性状が現れるのか等実験のため、本節では、再生骨材とフライアッシュに関する既往の研究を取り上げた。それらから得られた多くの実験結果の報告からいくつかの課題をとりあげ、本研究を実施した。

1.3.1 再生骨材コンクリートの強度発現性状に関する既往の研究

再生骨材コンクリートにフライアッシュを外割置換することによって、材齢3日や7日程度で、フライアッシュ無置換のコンクリートよりも強度が増加するという研究論文は、松坂ら^{注1-2)}、松下ら^{注1-3)}やKouら^{注1-4)}、石山、原、江口、橋本らが発表している。

松坂祐介ら^{注1-2)}は、「低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能について、廃棄コンクリートを破碎処理して得られる低度処理再生骨材は、骨材表面に脆弱なモルタルやセメントペーストが付着している。そこで、骨材への付着モルタルの除去の簡易な手法として、コンクリートミキサーによる再生骨材の空練り処理を試みた。また、フライアッシュを混和した再生コンクリートを作製した。空練りを行った再生骨材について骨材試験を行った結果、再生粗骨材については密度が大きくなり、吸水率が小さくなる結果となった。一方、再生細骨材については密度が小さくなり、吸水率が大きくなった。これは、空練りによって再生骨材から剥がれ落ちた付着モルタルや微粒分が再生細骨材に混入したためと考えられる。これらのことから、骨材の空練りによって骨材表面の中性化した脆弱な付着モルタル上層部が剥がれ落ち、露出した付着モルタル中の水酸化カルシウムとフライアッシュが比較的早期に反応することによって、再生骨材界面にポゾラン反応相が形成されたことが強度向上に寄与したものと推定される。一方、フライアッシュ無混和の再生コンクリートについては空練り実施による強度向上効果が得られず、長期強度は空練りを行っていない方が大きい傾向を示した。これは、空練り処理によって生成した微粒分の混入が、コンクリートの強度増進を阻害したものと考えられる注1-2)。」と考察している。

強度増進の機構を、再生骨材に付着する旧セメントペースト中の水酸化カルシウムとフライアッシュのポゾラン反応が比較的早期に反応することによって強度向上に寄与したと述べている。

松下博通ら^{注1-3)}は、「再生細骨材を使用したモルタルの強度低下機構について細孔構造の観点から考察した。再生細骨材を使用したモルタルはセメントペー

スト部の細孔構造がポーラスになり、強度や耐久性が低下する。この細孔構造がポーラスになりまた粗大化による強度低下の改善を目的として各種混和材を混入した。

その結果、混和材を混入することにより再生骨材モルタルの強度が改善されることを明らかにした。

再生コンクリートの強度及び耐久性はセメント総水量比C/TWによって一義的に表現可能であるとされているが、その原因については十分には明確になっていない。一般的に、普通強度レベルのコンクリートの強度は骨材とセメントペーストの界面部分に存在する遷移帯に依存する。遷移帯は、粗大な空隙に富む不連続な領域であり、強度や物質透過性といったコンクリートの品質に大きく影響を与える。そこで、細孔構造の観点から再生細骨材を使用したモルタルにフライアッシュといった混和材の混入により、再生骨材モルタルの細孔構造の緻密化を図り、その効果を検討した。

再生細骨材モルタルにフライアッシュを混入した再生細骨材モルタル中のペースト部の細孔容積は、初期材齢から緻密化が確認され、長期材齢になるに従い、大幅な細孔構造の粗大化が改善されている。また、置換率の増加に伴い大きくなった。これは、フライアッシュのポゾラン反応によるものである。

再生骨材を表乾状態でモルタルを造ったとし、新セメントペースト部の細孔構造がポーラスになり、強度が低下する。しかし、各種混和材を混入することにより強度がある程度改善可能である。これは、混和材の混入に伴う緻密化によるものである。フライアッシュを混入した再生モルタルの強度は初期材齢からの細孔構造の緻密化により、置換率の増加にともない大きくなった^{注1-3)}。」と考察した。

Kouら^{注1-4)}は、「再生骨材コンクリートにおいて、フライアッシュ置換の有無により、材齢28日以降の強度増進に対してフライアッシュのポゾラン反応が主たる原因である^{注1-4)}。」と述べているが、その中の表8(本論文では図-1-1)で、セメントのみとセメント質量の25%のフライアッシュを内割混入した2つに分け、それぞれに、再生骨材を 0, 20, 50, 100% と細砂置換していったモルタルを作成した。フライアッシュ無混入の再生骨材50から100% 細砂置換モルタルでは、再生骨材の増加だけでは材齢1、4、7日と圧縮強度が低下している。他方、フライアッシュ25% 混入の再生骨材50%から100%細砂置換したものの圧縮強度は、材齢1、4、7、28、90日と表しているが、この1、4、から7日までの初期材齢において明らかに圧縮強度が増加しているにも関わらず、長期材齢については触れているが、フライアッシュを置換したこの初期材齢の強度増加については触れていな

い。このことは、本論文では、フィラー効果として定義している。

再生骨材の増加だけでは下がっている

Table 8 Compressive strength of the concrete mixtures in Series I (w/c = 0.55)

Notation	Fly ash (%)	Recycled aggregate (%)	W/B	Compressive strength (MPa)				
				1-day	4-day	7-day	28-day	90-day
R0	0	0	0.55	12.8	23.3	30.2	48.6	52.7
R20	0	20	0.55	11.9	22.4	29.1	45.3	50.8
R50	0	50	0.55	11.6	21.8	27.6	42.5	49.5
R100	0	100	0.55	10.2	18.6	24.4	38.1	45.5
R0F25	25	0	0.44	15.6	30.4	38.8	52.9	43.6 ^a 68.8 57.9 ^a
R20F25	25	20	0.44	14.8	29.5	37.9	50.1	42.8 ^a 65.9 57.3 ^a
R50F25	25	50	0.44	14.1	28.4	37.0	48.1	41.7 ^a 63.7 53.4 ^a
R100F25	25	100	0.44	16.3	29.0	36.3	45.3	36.8 ^a 65.4 50.1 ^a

^a Fly ash was used as a replacement of cement [1]

フライアッシュはセメント置換

長期材齢については、言及しているが、初期材齢の強度増加については特に言及はなし

FAを置換すると初期強度が上がっている

図-1-1 再生骨材量と FA 混入による圧縮強度 by Kou ら

石山貴英ら^{注1-5)}らは、「比較的低品質な再生骨材を使用したコンクリートに、フライアッシュを外割混合して、コンクリートの高品質化を図ることを目的とし、普通強度域と高強度域に水セメント比を設定して、単位フライアッシュ量を変化させて力学性状の実験を行った。フライアッシュを外割混合した再生骨材コンクリートの圧縮強度は、高強度域になると圧縮強度低減率が大きくなり、その傾向は、再生細粗骨材を使用したときに顕著であった。

使用した比較的低品質な再生骨材には、JIS A 5022 「再生骨材Mを用いた再生骨材コンクリート」に規定されている再生骨材Mである。原骨材はRC造建築物であった。

フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」Ⅱ種に適合するものである。フライアッシュをセメント代替ではなく、砂代替とする外割調合則とした。

普通強度域の調合では、単位水量を185kg/m³、W/Cを65%、単位セメント量を285kg/m³で一定とし、高強度域では、それぞれ165kg/m³、W/C26%と631kg/m³で一定とした。

普通強度域では、単位フライアッシュ量の増加、材齢の経過に伴い圧縮強度

石山貴英ら、
(コンクリート工学年次論文集、Vol.31, No.1, 2009)

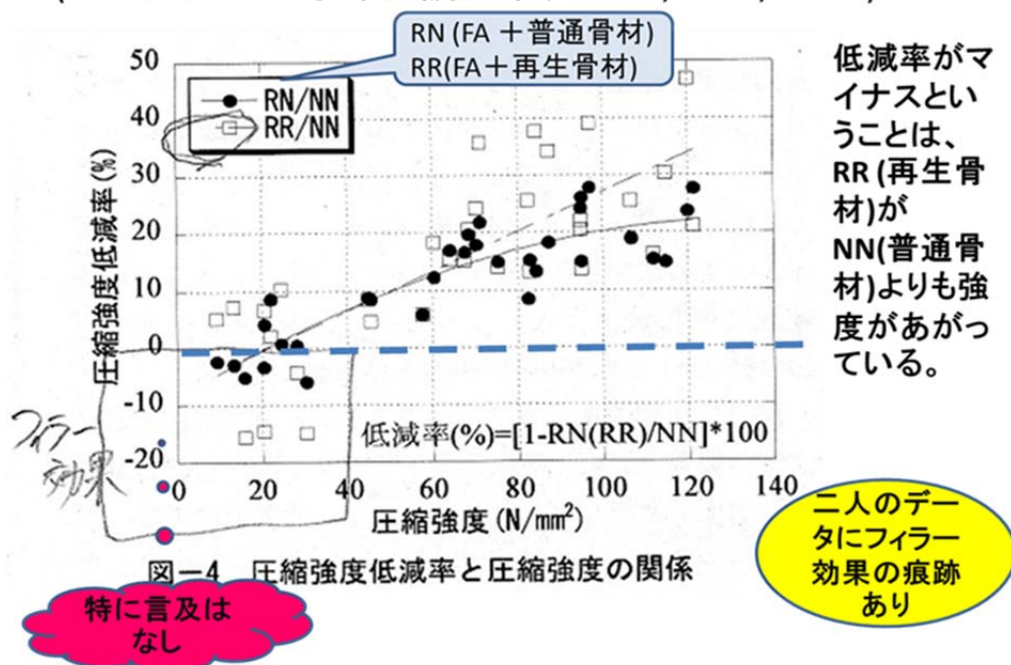


図-1-2 圧縮強度低減率と圧縮強度の関係 石山貴英 ら

が増加した。また、普通骨材と再生骨材との種類の違いによる圧縮強度の差はほとんど見られなかった。フライアッシュの混合量が多いほど、再生骨材を使用しても圧縮強度が大きくなった。

高強度域では、普通骨材と再生骨材と使用する骨材によって圧縮強度に差があったが、材齢91日という長期になると、再生骨材を使用してもフライアッシュを外割混合することにより、高強度コンクリートを製造できる可能性が示された。ただ、高強度域では単位フライアッシュ量が多すぎると、圧縮強度が低下する傾向がみられ、フライアッシュが多すぎると悪影響を及ぼす場合があった^{注1-5)}。」と報告している。

この石山らの論文のなかの「図-4(本論文では図-1-2) 圧縮強度低減率と圧縮強度の関係」で圧縮強度低減率が、フライアッシュを細砂置換した普通骨材、再生骨材ともマイナス7から17にもなっており、低減率がマイナスになったということは、フライアッシュ無混入と比較して、強度が上がっていることを示している。特に再生骨材使用時にはマイナス16～17と大きな変化を示している。

この部分について石山らは特に言及はしていないが、この部分とKouらのフライアッシュを置換すると再生骨材モルタルの初期材齢強度が上がっているという部分が本論文にとりあげているフィラー効果の部分と見受けられる現象が見受けられる。

原勝哉ら^{注1-6)}は、「高強度コンクリートである廃品コンクリートポールを原料とする、JIS規格の再生骨材Lの範囲内である骨材を全量使用とし、強度発現性状について実験的に検討し、再生骨材の高強度コンクリートへの利用の可能性を追求した。

普通骨材と再生骨材がフライアッシュコンクリートの強度発現性状に与える影響についての考察と、再生骨材フライアッシュ混入コンクリートのポゾラン反応促進の検証を行った。

一般に、低度処理再生骨材コンクリートは低度処理再生骨材周辺の微粉末や骨材表面の空隙等の影響でセメントペーストとの付着強度が小さく、W/Cに対する圧縮強度の発現には限界があり、再生骨材コンクリートの圧縮強度はあまり期待できないと言われている。しかしながら、今回の実験では、W/Pが39%配合の低度処理再生骨材コンクリートの圧縮強度が、材齢28日で 50N/mm^2 以上に達している。この要因としては単位水量が 144kg/m^3 と通常に比べて非常に小さく、W/C、W/Pが小さかったことが推察される。再生骨材LであってもW/C、W/Pを小さくすることによって、高強度コンクリートと同程度の再生骨材コンクリートを製造できる。

・再生骨材フライアッシュ混入コンクリートのポゾラン反応促進の検証について

今回の実験において、低度処理再生骨材にフライアッシュを混入しW/Pを低くすることで高強度レベルのコンクリートを製造することができた。高強度化の要因としてフライアッシュの効果が期待される。

再生骨材モルタルでは再生骨材に含まれる旧コンクリートのセメントペーストの中に水酸化カルシウムが存在するため、普通骨材よりも初期材齢時における水酸化カルシウムの含有量が多い。故に、再生骨材フライアッシュ混入モルタルは、早期からポゾラン反応のために、水酸化カルシウムが消費される。今回の実験においてもこの水酸化カルシウムが関与した初期材齢時からのポゾラン反応と、細骨材とモルタルペーストとの遷移帯にフライアッシュの微粉末が関与して、マイクロフィラー効果が大きく表われると推察している。フライアッシュは微粉末であるため、シリカフュームや石灰石微粉末と同様にマイクロフィラー効果による圧縮強度の増進機能が認められる。このマイクロフィラー

効果は、ポゾラン反応と異なり、長期材齢より初期材齢において顕著であると考えられている。ゆえに、普通骨材フライアッシュコンクリートと比較して、再生骨材フライアッシュコンクリートの初期ポゾラン反応とフィラー効果による強度増進効果は大きい^{注1-6)}。」と報告している。

江口正晃ら^{注1-7)}らは、「骨材全量に廃品コンクリートポールを原コンクリートとする低度処理再生骨材コンクリートに振動付与練混ぜを行い、硬化特性を検討した。その結果、単位水量 $155\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比30%、フライアッシュを細骨材容積置換20%混入することによって、材齢91日強度が $80\text{N}/\text{mm}^2$ 近くまで増進し、ポゾラン反応が期待できることが明らかになった。

今回使用した再生骨材は、廃品コンクリートポールを原コンクリートとし、細骨材は、JIS 規格の再生細骨材Lの範囲である。粗骨材は、吸水率は再生骨材Lの範囲内であるが、微粒分量が再生粗骨材Lの範囲外である。

単位水量を $155\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とし、W/Cを30%、50%(比較用)の2種類とした。

・圧縮強度特性について

全てのコンクリートにおいてW/Cが小さいほど圧縮強度は大きくなった。一般に、低度処理再生骨材コンクリートは低度処理再生骨材周辺の微粉末や骨材表面の空隙等の影響でセメントペーストとの付着強度が小さく、W/Cに対する圧縮強度の発現には限界があり、あまり期待できないと言われている。これは、低度処理再生骨材の表面に多くの微粉や旧モルタルが付着するために、同じW/Cの普通骨材を用いたコンクリートと比較して強度が小さい。骨材界面とセメントペーストとの境界面である遷移帯が脆弱であるためと考えられる。しかしながら、今回の実験では、W/Cが30%の配合の圧縮強度が、材齢91日で $50\text{N}/\text{mm}^2$ 以上に達している。再生粗骨材がJIS 規格L級以下であっても、W/Cを30%まで小さくすることによって、 $50\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高強度レベルの再生骨材コンクリートを製造する可能性がある。

一方、フライアッシュを細骨材置換した配合では、W/C、振動の有無に関係なく、材齢91日で70%以上の強度増進率が得られた。低度処理再生骨材であっても、ポゾラン反応は十分に発現することが明らかになった。再生細・粗骨材とセメントでは遷移帯が脆弱であるのに対し、フライアッシュを混入することで、遷移帯が強固になった。

これらのことから、再生骨材Lの品質以下の低度処理再生骨材コンクリートであっても、フライアッシュを混入することで長期強度を増進させることができるということが明らかになった^{注1-7)}。」と報告している。

橋本親典ら^{注1-8)}は、「再生細・粗骨材ともにJIS規格L級再生骨材を使用したコ

ンクリートの強度ならびに耐久性の向上を図ることを目的とし、フライアッシュを細骨材代替として用いたコンクリートの強度について実験的検討を行った。

再生骨材は、廃品コンクリートポールを破砕・洗浄したものを使用した。

JIS A 5023-2006 のL級再生骨材の品質規格に細骨材は満たし、粗骨材の微粒分量以外はL級の品質を満足する。

フライアッシュは、Ⅱ種相当を使用した。

練混ぜには、60リットルの振動付与2軸強制練混ぜミキサを用いた。

配合条件は、Wを155kg/m³で一定とし、W/Cを30%、50%の2種類とし、フライアッシュは細骨材置換で混入した。

・今回の実験結果について

フライアッシュ無混入の材齢7日強度を基準として、その後の材齢に伴う圧縮強度の増加割合(強度増進率)を記すと、W/C30%の配合は、材齢7日から91日で強度増進率が29%であった。W/C50%の配合の場合は、15%程度であった。一方、フライアッシュを添加した配合は、W/Cや振動の有無に関係なく、材齢91日で40%以上の強度増進率が得られた。低度処理再生骨材であっても、ポズラン反応は十分に発現することが明らかになった。

振動の影響に関しては、W/Cに関係なく振動付与の配合が、強度増進率が高い。以上の結果から、再生骨材L級の低度処理再生骨材コンクリートであっても、フライアッシュを混入することで長期強度を増進させることができるということが明らかになった^{注1-8)}。」と報告している。

橋本親典ら^{注1-9)}は、「再生骨材とフライアッシュを混入することによって、材齢7日や28日程度で、フライアッシュ無混入の基準配合の強度よりも同一材齢において強度が増進するという研究論文が数多くある。旧セメントガラの水酸化カルシウムとフライアッシュのポズラン反応が初期に発生していると考察している。

一方、硬化活性のない鉱物質微粉末をコンクリートに練り混ぜると、強度が増大するという報告から、これをフィラー効果と定義し、再生骨材フライアッシュコンクリートの初期材齢時の強度発現機構に、このフィラー効果も寄与していると想定した。

上述した2つの仮説の妥当性を検証するために、各種の硬化活性のない鉱物質微粉末を添加した再生細骨材モルタル供試体ならびに、再生骨材を微粉砕化した再生骨材微粉末とフライアッシュを添加した石灰石細骨材モルタル供試体を用いて、フライアッシュモルタルの初期材齢強度の増進に対してポズラン反応とフィラー効果の影響について実験的検討を行った。

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント、フライアッシュはJIS 規格Ⅱ種を使用した。フライアッシュとのフィラー効果を検討するために試薬特級炭酸カルシウムと二酸化ケイ素を異なる硬化活性のない鉱物質微粉末として実験に用いた。

再生微粉は、廃品コンクリートポールを原コンクリートとする再生粗骨材を粉砕機に掛け、微粉砕後 $100\mu\text{m}$ のフルイを通過して得られたものを使用した。また、水酸化カルシウムは、他の不純物とフライアッシュとの反応を極力排除するため、高純度の試薬特級水酸化カルシウムを用いた。

細骨材は、石灰石細砂を使用した。

再生細骨材は、単位セメント量が $500\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の廃品コンクリートポールを破砕・洗浄したL級を使用した。

配合は、第一シリーズと第二シリーズとに分け、第一シリーズは、W/Cを50%、単位水量と単位セメント量を一定にした4種類のモルタル供試体を作製した。細骨材の一部としてフライアッシュ、炭酸カルシウムおよび二酸化ケイ素の微粉末を添加し、 $(S + \text{微粉末重量})/C$ を3.0で一定とした。微粉末は、セメント質量20%で一定とした。普通細骨材と再生細骨材で密度が異なるため、練混ぜ容積は異なる。

また、第二シリーズは、W/Cを50%、S/Cを3.0として、単位セメント量を一定にした。前シリーズと大きな違いは、第一シリーズは、フライアッシュを含む微粉末は、セメント質量の20%を置換したが、第二シリーズは、細骨材質量の1/3をフライアッシュに内割置換した。他の微粉末である再生微粉末は、セメント質量に対する外割置換率として、3、5、10%の3水準とした。水酸化カルシウムの置換率は、5、10%の2水準とした。比較用として、再生微粉末や水酸化カルシウムを混入しないモルタルを作製した。

・第一シリーズの圧縮強度試験結果および考察

普通細骨材モルタルの圧縮強度試験の結果と再生細骨材モルタルの圧縮強度試験の結果を比較すると、材齢7日で、再生細骨材使用により約 $20\text{N}/\text{mm}^2$ の強度低下が生じており、その後の材齢においてその差は $15\sim 13\text{N}/\text{mm}^2$ に減少したものの再生細骨材モルタルの強度が低かった。普通細骨材に3種類の異なる鉱物質微粉末を添加しても、材齢7日から91日の長期材齢の範囲において、強度の増加は認められず、無添加の普通細骨材モルタルとほぼ同じ強度発現性状であった。

一般的には、再生骨材を使用すると強度が小さくなる。今回の実験においても、普通細骨材モルタルと比べると、再生細骨材モルタルの強度は小さくなった。しかしながら、再生細骨材に3種類の異なる硬化活性のない鉱物質微粉末を

添加すると強度にそれぞれの差が現れた。その中でも、やはりフライアッシュを添加した配合がもっとも強度増進が大きくなった。外割で置換したフライアッシュが材齢7日の初期の段階から強度増進が得られたのは、再生骨材に含まれるアルカリ分の刺激によるポズラン反応またはフィラー効果であると考えられる。28日以降の強度の伸びは、新たにセメントの水和反応により生成された水酸化カルシウムとフライアッシュとのポズラン反応によるものと思われる。

一方、セメントと再生細骨材のみの供試体よりも、炭酸カルシウムと二酸化ケイ素の微粉末を添加した供試体の方が、硬化活性がないにもかかわらず、強度が大きい。これは、細骨材とモルタルペーストとの遷移帯にそれらの微粉末が充填されるフィラー効果によるものと思われる。この効果がフィラー効果と考えられる証拠として、効果が材齢7日から14日までに顕著に表われており、材齢28日以降は本来のセメントによる強度の発現により、その差が次第に減少した。そして、材齢91日において再生細骨材モルタルの強度とほぼ同一になり、フィラー効果が零になった。これに対して、再生細骨材におけるフライアッシュのポズラン効果による圧縮強度の増分は、材齢91日において 10N/mm^2 程度あり、これは、フィラー効果ではなく、新しいセメントとフライアッシュによるポズラン反応によるものである。

興味深い点は、普通細骨材モルタルにおけるポズラン反応効果やフィラー効果は全くないという点である。今回の早期のポズラン反応や微粉末による強度増進は、再生細骨材とセメントペーストの境界に生成される不規則な遷移帯において発生するものであり、普通骨材とセメントペーストの遷移帯では発生しないものと思われる。

・第二シリーズの圧縮強度試験結果および考察

フライアッシュ無混入とフライアッシュ混入の場合の再生骨材微粉末混入モルタル供試体の圧縮強度の試験結果を考察する。

フライアッシュ無混入の場合、再生骨材微粉末の強度増進効果は認められなかった。むしろ、セメント量が一定にも関わらず、添加率が増加するほど、同一材齢時の強度は低下した。

これに対して、再生骨材微粉末の混入に関係なく、フライアッシュ混入配合は、各材齢の強度がすべて大きかった。普通骨材モルタルのみと普通骨材モルタルの細砂置換1/3フライアッシュ混入とを比較すると、材齢28日で 25N/mm^2 以上の差があった。フライアッシュを細骨材の1/3内割置換することによるフィラー効果が非常に大きいと言える。

一方、フライアッシュ混入モルタルでは、再生微粉末混入の初期ポズラン反

応による初期強度増加を確認することはできなかった。むしろ、微粉末の種類に関係なく、置換率が増加するに従い強度が低下した。

また、フライアッシュ混入モルタルにおいて、再生骨材微粉末を混入していないモルタルの強度を基準として再生骨材微粉末混入の各材齢の強度の低下率を求めた。材齢に関係なく、置換率が増加するに従い、強度の低下率が大きくなった。

以上の結果より、今回の実験では、再生骨材微粉末とフライアッシュの初期ポゾラン反応による強度増加はなく、初期ポゾラン反応の効果自体に疑問が生じた^{注1-9)}。」と報告している。

1.3.2 普通骨材を対象にフライアッシュによるポゾラン反応に関する研究

普通骨材にフライアッシュを混練りし、ポゾラン反応に関する研究としては、山崎、佐伯、馬越らの研究報告がある。

山崎寛司^{注1-10)}は「鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果について、の報告のなかで。セメントペースト中で化学反応をおこさないと考えられる微粉末でも、コンクリートの強度にかなりいちじるしい影響をおよぼすことを確かめた。

その原因を調べるために、モルタルのペースト部分の打ち込み後の体積変化など純空げきセメント比およびペースト部分単位容積中の個相容積(単位個相容積)と強度との関係について、考察した。

ついで、微粉末を用いた場合のペースト部分の結合水量、単位個相容積を試験し、ペースト中で化学反応をおこさない微粉末でも、これを用いることによってセメントの水和の程度を増加させることを確かめ、その理由について考察した。鉱物質微粉末のなかでもポゾランの場合にはポゾラン反応の影響などによるもので、一般的にいつて微粉末の使用によるペースト部分の単位個相容積の変化によるものであるといえる。

微粉末の使用量と圧縮強度との関係は、微粉末を骨材の一部とおきかえて用いると、微粉末の種類によって差はあるが、共通して、圧縮強度および引張り強さ係数は増加し、強度比率は微粉末の使用量の増加にしたがって増加する。

安定な岩石粉末を骨材の一部とおきかえた場合の影響は、ポゾランなどを用いた場合とその傾向が異なるが、これを用いて単位水量がいちじるしく増加することがなければ、単位セメント量の50%程度まで用いても、強度に対して有害な影響はなく、むしろコンクリートの初期の強度を増加させる効果がある。

鉱物質微粉末を用いたモルタル中のペースト部分の結合水量および単位個相容積を試験し、それらの値と強度との関係を検討した。水硬性のない岩石微粉

末を砂の一部に置き換えた場合、基本モルタルの強度に対する百分率で示すと、各材齢において100%以上の強度比率を示した。強度比率は材齢が短いほど大きく、材齢が長くなるにしたがって低下する。また、各材齢において、微粉末の使用量が多いほど大きな値を示している。ポゾランのフライアッシュの場合も、材齢3日ないし28日では岩石微粉末と同様の傾向を示すが、材齢28日から91日の間の強度比率の増加がいちじるしい。

水硬性のない安定な微粉末では、微粉末とセメント成分との化学反応がほとんど考えられないことから、微粉末の使用によるセメントの水和の程度の増加は物理的な関係からおこったものと考えられる。

微粉末を用いた場合におけるセメントの水和の程度の増加に関して、水硬性のない安定な岩石粉末でもこれを用いることによって、セメントの水和の程度が増加することが明らかになった。

ポゾランであるフライアッシュを用いた場合、材齢91日以降でポゾラン反応による結合水の増加が認められる。ポゾラン反応のおこる場合は、ポゾラン反応による水和物の増加およびそれにともなうゲル水の増加のほかに、ポゾラン反応をおこしたポゾラン粒子の未反応部分が水和物と固く結びついて、未水和セメント部分と同様、強度に関係する水和物の一部となることが考えられる。

これらの結果、鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響には、微粉末の使用によるコンクリートの単位水量、単位セメント量および空気量の変化、練り混ぜてからの体積変化による純セメント空げき比の変化、物理的な作用によるセメントの水和の程度の増加、微粉末の化学反応による水和物の増加、および化学反応による未反応の微粉末粒子と水和物との強固な結合などの諸因子があることが明らかになった。これらはいずれもコンクリート中のペースト部分の単位固相容積に影響をおよぼすものであって、これらを総括すると「微粉末がコンクリートの強度におよぼす影響は、主として微粉末によるコンクリート中のペースト部分の単位個相容積の変化によるものである」ということができる^{注1-10)}。」と報告している。

佐伯竜彦ら^{注1-11)}は、「フライアッシュと水酸化カルシウムの反応性についての報告の中で。セメントの水和によって生成される水酸化カルシウムは、コンクリートの強度や中性化に対する耐久性等に影響を及ぼす。一方、フライアッシュは、水和熱の低減やアルカリ骨材反応の抑制等を目的とし、コンクリート用混和として広く用いられている。そのフライアッシュは、ポゾラン反応により水酸化カルシウムを消費する。従って、フライアッシュを混和したコンクリートの諸性質を前もって推定するためには、フライアッシュによる水酸化カルシ

ウム消費量を明らかにする必要がある。

フライアッシュの水酸化カルシウム消費モデルを確認する検証実験では、2種類の実験を行った。一つは、ペーストで行い、他方はモルタルを用いた。

添加する水酸化カルシウムは、特級試薬とした。

今回の実験では、セメントおよびフライアッシュの水和度の指標として、結合水量を測定した。測定は、1000℃で供試体を加熱することにより行い、前後の重量差より結合水量を求めた。

ペーストおよびモルタル中の水酸化カルシウム量は、DSCにより測定した。

・フライアッシュによる水酸化カルシウムの消費量の経時変化について

消費量は水酸化カルシウム添加量が大いほど大きく、また、消費量の伸びは、材齢初期に大きく、長期においては小さくなっている。従って、フライアッシュと水酸化カルシウムの反応性は、水酸化カルシウム量と水和度に影響を受けるものと考えられる。

フライアッシュは、水酸化カルシウムと反応してCSHを生成することから、 SiO_2 量の多いものほど水酸化カルシウムとの反応性が高いものと考えられる。

実験の結果、フライアッシュの存在によりセメントの水和が促進されていると考えられる。また、材齢7日から28日の間で水酸化カルシウムが減少し、明らかにポゾラン反応の影響が見られる。ゆえに、フライアッシュの水酸化カルシウム消費速度は、未反応水酸化カルシウム量が多いほど、フライアッシュの水和度が低いほど大きい^{注1-11)}。」と報告している。

馬越唯好ら^{注1-12)}は、「フライアッシュを骨材の一部に代替して多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究として、圧縮強度および水密性等について検討した。その結果、圧縮強度は単位フライアッシュ量が増加するほど、また材齢が長期になるにつれて増大する傾向がみられた。また、増粘剤型の高流動コンクリートに比べて、水密性はより改善される傾向がみられた。

これまで、石炭灰を細骨材の一部に代替して多量使用したコンクリートに関する実験および実構造物施工を行い、普通コンクリートと同等以上の初期強度の発現、水密性の向上等の優れた品質改善効果があることを確認した。

近年、コンクリート工事の合理化、省力化、低騒音化を目的として高流動コンクリートを使用する施工事例が増えている。特に、過密配筋による締固め困難な構造物に対しては、フレッシュ時の特性である自己充填性を期待して高流動コンクリートによる施工がなされている。

そこで、石炭灰のより一層の大量有効利用という観点から、フライアッシュを細骨材および粗骨材の一部に代替して多量に使用した高流動コンクリートに

について検討を行った。

・使用材料について

フライアッシュはJIS 規格Ⅱ種相当品を細骨材および粗骨材の代替として使用した。粗骨材・細骨材とも砕石・砕砂を表面乾燥飽和状態で使用した。

配合と試験方法は、単位水量を 175kg/m^3 の一定とし、単位セメント量はフライアッシュを用いた場合には、 240kg/m^3 、フライアッシュを用いない増粘剤型の場合 300kg/m^3 とした。フライアッシュは細骨材および粗骨材の代替として使用することとし、フライアッシュの単位量は0、200、300、400、 500kg/m^3 とした。

圧縮強度試験供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱形型枠に、透水試験は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の中空円筒供試体を用いた。

・実験結果および考察

圧縮強度について。単位セメント量 240kg/m^3 でフライアッシュを多量に用いた高流動コンクリートの圧縮強度は、単位フライアッシュ量が増加するにつれて、また、材齢が長期になるにしたがい、高くなる傾向がみられた。フライアッシュを用いない増粘剤型の高流動コンクリートでは単位セメント量が 300kg/m^3 とフライアッシュを用いた場合に比べ 60kg/m^3 多いにもかかわらず、単位フライアッシュ量が 300kg/m^3 以上になるとフライアッシュを用いた高流動コンクリートの方が材齢28日における強度が高くなることがわかった。また、材齢91日においてはフライアッシュを用いた方がいずれの配合も強度が高くなり、ポズラン反応による影響であると考えられる。

・水密性についての考察

高流動コンクリートの透水試験を行った結果、フライアッシュを多量に用いた高流動コンクリートの拡散係数は、フライアッシュを用いない高流動コンクリートよりも小さくなり、水密性が高くなることがわかった。これは、フライアッシュの微粉末効果と考えられる。また、フライアッシュを用いた高流動コンクリートの拡散係数を比較すると、単位フライアッシュ量が増加するにつれて拡散係数が小さくなり、水密性が改善される傾向がみられた^{注1-12)}。」と報告している。

1.3.3 普通骨材モルタルにフライアッシュを用いたときのフィラー効果に関する既往の研究

遠藤らは、普通骨材モルタルを用いてフライアッシュのフィラー効果に関する研究を報告した。

遠藤崇司ら^{注1-13)}は、「フライアッシュなどの混和材の活性度は、セメントの一部を混和材で質量置換したモルタルの圧縮強度を、セメントのみを用いた基準

モルタルの圧縮強度で除した値(%)である活性度指数で評価されている。しかし、この活性度指数には混和材の活性のほかに、混和材粒子が存在することによる強度発現効果も含まれていると考えられる。この後者の強度増進効果について、硬化活性のない鉱物質微粉末を用いて調べた。

使用材料のうち、硬化活性のない鉱物質微粉末としては、標準砂をセメントと粒径がほぼ等しくなる程度までボールミルで粉砕したけい砂粉末を用いた。細骨材には天然川砂を使用した。

基準モルタル作製のほか、これらのモルタル中のセメントの一部をけい砂粉末で置換して、モルタルの強度発現に及ぼす鉱物質微粉末の影響を調べた。けい砂粉末による置換には、体積置換を適用した。

セメントの一部をけい砂粉末で体積置換したモルタルの圧縮強度は、同じ基準モルタルの圧縮強度と比較して、何れも同等以上になっており、両者の強度差は置換率が大きいほど大きい傾向が認められる。これは、セメントと水から成る相におけるセメント粒子間に鉱物質微粉末が入り込むと強度が増大し、この効果は微粉末の量が多くなるほど大きくなる。ただし、この強度差は、材齢28日で最大となり、材齢91日では材齢28日より小さくなる。これは、材齢が長期になると、セメントの水和が更に進みその影響が支配的になり、モルタルの強度発現に及ぼす微粉末の寄与率が次第に小さくなっていくと考えられる。また、セメント置換量が多くなりすぎ、セメント量がある限度を超えて少なくなるようなセメントペースト中においては、鉱物質微粉末がセメント水和物を架橋接続する効果さえも無くなる可能性が大きいことを示している^{注1-13)}。」と報告している。

1.3.4 骨材とセメントペースト間の遷移帯に関する既往の研究

普通骨材あるいは再生骨材とセメントペーストとの遷移帯に空隙の大小や量、細孔組織の緻密化について報告したものに、陶山ら、佐川ら、内山らおよび加藤らがある。

陶山祐樹ら^{注1-14)}は、「フライアッシュや碎石粉などの副産物として発生する無機質紛体をコンクリートに外割混合することで、その紛体に水硬性がなくとも、圧縮強度が増加することが知られている。しかし、このときの強度増加のメカニズムについては不明な点が多く必ずしも解明に至っていない。副産物として発生する各種紛体を外割混合したコンクリートの圧縮強度を調合設計の段階で推定する手法は必ずしも確立されていない。ここでは、コンクリートに紛体を外割混合することで硬化体の総細孔量に変化せずとも個々の細孔が緻密になり、その結果、圧縮強度に悪影響を与える50nm以上の細孔量が減少することに着目

した。

ここでは、紛体の外割混合によるコンクリートの圧縮強度増加のメカニズムを明らかにし、その推定方法について検討した。

紛体を外割混合することでモルタルの細孔量に変化せずとも個々の細孔のサイズが小さくなる場合があることを示した。そして、この細孔組織の細分化が圧縮強度に与える影響を明らかにし、圧縮強度増加の主要因となることを示した。

細孔組織の空隙を粒子間空隙と架橋間空隙に分類する。粒子間空隙は、接する紛体の粒子同士の隙間である。架橋間空隙は、凝集体の架橋によって作られる粗大な空隙である。

一般に水硬性がないといわれる砕石粉を混合した試験体であっても、圧縮強度は材齢3日から365日において同水セメント比で、普通ポルトランドセメント単味のものより高く、単位混合材量の増加に伴って高くなる傾向を示した。砕石粉および石灰石粉を混合した試験体における圧縮強度の増加は、水硬性を主たる要因として説明できないため、両混合材の物理的な作用が圧縮強度を増加させたと推察される。

フライアッシュを混合した試験体は、材齢3、7日において砕石粉を混合した試験体と同程度の圧縮強度を示した。しかし、材齢28日以降では、砕石粉を混合した試験体より高い圧縮強度を示した。フライアッシュのポゾラン反応の開始時期は、養生温度20℃の環境下で材齢28日といわれているのとは一致した。このことから、フライアッシュを混合した試験体は、材齢7日以前において、砕石粉と同じメカニズム即ち物理的な作用によって普通ポルトランドセメント単味の試験体より高い圧縮強度を示したこと、材齢28日以降においてポゾラン反応が顕在化することで更に高い圧縮強度を示したことが推察される。

これらのことから、たとえ外割混合した混合材の水硬性が無視できる場合であっても、単位混合材量の増加に伴ってモルタルおよびコンクリートの圧縮強度が高くなることが確認された。

以上の実験結果から、水硬性が無視できる紛体を外割混合したコンクリートにおいて、たとえ総細孔量が普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと同程度であっても、個々の細孔が細くなる(細孔組織が細分化する)ことが確認された。紛体を外割混合したコンクリートの圧縮強度増加には、細孔組織の細分化が影響することが推察される。このことから、紛体を外割混合したモルタルにおいて、50nm以上の細孔量の減少が圧縮強度を増加させた要因となったことが考察される^{注1-14)}。」と報告している。

佐川康貴ら^{注1-15)}は、「再生粗骨材を使用したコンクリートにおいて、再生粗骨材中の水分が圧縮強度に及ぼす影響について、含水状態の異なる再生粗骨材を用いたコンクリート供試体の強度発現性について検討を行った。表面乾燥飽水状態(表乾状態)やプレウェッティングした再生骨材に含まれる水分が、練混ぜ時に水セメント比を増大させること、高吸水率の骨材を使用したコンクリートにおいて、骨材周辺のセメントペースト部にはビッカース硬度が低く、空隙構造が粗な部分が形成されることを明らかにした。

使用した再生粗骨材はL級に該当し、表面乾燥飽水状態(表乾状態)にしたものと、絶乾状態の2種類に分けた。

- ・含水量の差異による強度への影響について

水セメント比W/Cが同じであれば、再生骨材コンクリートは普通骨材使用コンクリートより強度が小さくなることが明らかとなった。強度の低下原因として、骨材の含水量の他に、骨材自身の強度の影響が考えられる。すなわち、低品質の再生骨材の場合には、付着モルタルの影響により骨材自身の強度が小さく、コンクリートの強度にも影響を及ぼすと考えられる。

- ・骨材とセメントペースト境界近傍におけるセメントペースト部の性状変化に関する検討について

高吸水率骨材を用いたコンクリートにおいて、骨材周辺のセメントペースト部において、組織がポーラスな部分が形成されることが予想される。そこで、低密度の部分においてどのような性状変化がおこるかを、モデル供試体を用いたビッカース硬度試験により確認する。

以上の実験結果より、高吸水率の骨材を用いたコンクリートでは、骨材周辺のセメントペースト部分において、強度の比較的低い領域が形成されることが予想される。一般に、コンクリートの破壊機構は境界より進展する微細ひび割れに起因する。よって、吸水率の高い再生骨材を用いたコンクリートの骨材周辺の強度は普通骨材使用コンクリートの場合よりも低下し、その結果コンクリートの強度も低下すると考えられる。

再生粗骨材を使用したコンクリートにおいて、その再生粗骨材の含水状態が異なれば、再生コンクリートの空隙構造に関して、新ペースト部の50nm～2 μ mの細孔容積が強度と良い相関がある^{注1-15)}。」としている。

内川浩ら^{注1-16)}は、「水セメント比0.40前後を堺として、硬化モルタル及びコンクリート中では骨材とセメントペースト界面に粗大な空隙に富む遷移帯が生成し、硬化モルタル及びコンクリートの諸物性に大きな影響を与える。ここでは、モルタル及びコンクリートとセメントペーストの空隙径分布の差から、遷移帯

の空隙量を算出し、遷移帯の厚さを推定する方法を考案し、それを用いて硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さを求め、強度との関係について検討した。

遷移帯は、材齢3日で形成されはじめ、材齢7日でその厚さは最大となり、以後減少する。遷移帯の空隙構造及び遷移帯の厚さの経時変化から、セメントペースト、モルタル及びコンクリートの間で見られる強度発現の相違を説明することができ、また発現強度を推定することができる。

・硬化体の空隙構造

硬化セメントペースト、モルタル及びコンクリート中の水隙と気泡の違いについて、直径 $30\mu\text{m}$ 以上の空隙を気泡、直径 $3\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$ を毛細管空隙と考えると、気泡量は材齢が変化しても殆ど変わらないが、毛細管空隙量は材齢の進行と共に減少する。毛細管空隙量の減少はセメントペーストで大きく、モルタル及びコンクリートでは、この順に小さい。

・遷移帯の厚さと強度との関係について

セメントペースト、モルタル及びコンクリートの強度発現状況は、モルタル及びコンクリートにおいては、遷移帯が形成される材齢3日以降、ペーストの強度との差が現れ始め、その差は材齢の経過と共に大きくなる。この傾向は、コンクリートにおいて特に顕著である。モルタル、コンクリートともに遷移帯の厚さの増加に応じて、発現する強度は低くなるが、遷移帯厚さに対する強度の低下率はコンクリートのほうがモルタルより大きい^{注1-16)}。」と報告している。

加藤佳孝ら^{注1-17)}は、「細骨材の量と比表面積(粒径)が、ペースト、モルタル、コンクリート等の硬化体中の遷移帯形成に与える影響について、細骨材の量および粒径を変化させたモルタルの細孔径分布および圧縮強度の測定を行った。その結果、細骨材量および比表面積の増加に伴い遷移帯細孔量は増加する傾向にある。

モルタルやコンクリートのように骨材を有するセメント混合物の場合は、骨材周辺部にセメントペーストと不連続な領域が生じる。この領域は遷移帯と呼ばれ、直径 50nm 以上の粗大な空隙を有しその厚さは水セメント比によって変化する。一般的に、遷移帯はコンクリート中の弱点部分と考えられており、コンクリートの物理的特性を理解するには遷移帯の特性を把握することが極めて重要である。

今回の実験では、細骨材の粒径がモルタル中の遷移帯に与える影響を把握することを目的としているため、細骨材をふるい分けした。1.18mm以上の粒径、0.6～1.18mmの粒径、0.6mm以下の粒径を持つ細骨材と、ふるい分けしていない

標準砂の4種類を使用した。

- ・実験結果および考察

モルタル中に存在する細骨材量が増加すると大径側の細孔量は増大するが、約70nm以下の細孔径分布は細骨材の量に依存せずにはほぼセメントペーストの細孔径分布と等しい。また、細骨材の粒径が大きくなると大径側の細孔量は増大するが、約50～70nm以下の細孔量は粒径の影響をほとんど受けない。

- ・遷移帯細孔量

細骨材量の増加に伴って遷移帯細孔量もほぼ単調に増加した。これは、遷移帯の存在場所が骨材周辺であることを考えると妥当な結果である。また、細骨材の粒径が小さいほど遷移帯細孔量は多くなる。これは、細骨材の粒径が小さくなるほど骨材同士が接する確率が増加し、これによって隣り合う骨材粒子間で遷移帯を共有するものが増加することによると考えられる。

- ・遷移帯細孔量が強度に及ぼす影響について

遷移帯細孔量の増加に伴って標準モルタルとの強度比は減少する。両者の間には相関関係があり、モルタルの圧縮強度は、混入された細骨材界面に形成される遷移帯細孔量によって表現することが可能であると考えられる。

細骨材の粒径が小さくなると、遷移帯細孔量は増加するが、遷移帯厚さは減少する^{注1-17)}。」と報告している。

1.3.5 ポゾラン反応の定量化に関する既往の研究

小早川らは、ポゾラン反応を水酸化カルシウムの生成量から定量化した研究を発表した。

小早川真ら^{注1-18)}は、「各種要因がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響を、水酸化カルシウム生成量、およびフライアッシュのポゾラン反応率から検討した。各種要因の違いにより、セメントの水和により副生する水酸化カルシウム量が増加し、またフライアッシュのポゾラン反応の開始時期や反応量が増加する事が明らかになった。使用材料は普通ポルトランドセメント、ブレン比表面積3370cm²/gとフライアッシュはブレン比表面積4000cm²/gを用いた。細砂は使用せず、セメント単味とセメントとフライアッシュ混合のペースト供試体を作製した。フライアッシュは0から60%と5段階の置換率で、その置換率に応じてセメントに対する相当重量を置換した。試料の大きさは、100mlのプラスチック容器中に充填し密封した。950℃の強熱減量と結合水量を求めた結果、フライアッシュ置換率0%の場合、水酸化カルシウムの生成量は材齢経過に伴い増加する。材齢28日では、各フライアッシュの置換率とともにセメントからの生成量に相当する分のみでポゾラン反応の進行は低い。材齢91日以降はフライア

ッシュ置換率増加に伴い、水酸化カルシウムの生成量が減少し、ポゾラン反応が進行していた。

フライアッシュのポゾラン反応開始時期は、養生温度が高い程早い。水粉体比が高い場合、また養生温度が高い場合に反応量が大きく、温度依存性が高い。

フライアッシュ置換率60%になると、ポゾラン反応が過度に進み水酸化カルシウムが消費され、水酸化カルシウムが不足した状態となり、硬化体そのもののアルカリ性が低下する自己中性化と呼ばれる現象も懸念される。

養生温度20℃の条件下では、フライアッシュのポゾラン反応は、材齢28日から91日にかけて進み、強度増進として表われる時期と一致している^{注1-18)}。」と考察している。

ポゾラン反応は、セメントの水和反応による水酸化カルシウムの生成量に依存するためである。しかし、再生骨材コンクリートでは、再生骨材の付着ペースト中に水酸化カルシウムが存在する。そのことに着目して、本研究では、フライアッシュを置換した再生骨材モルタルでは、材齢3日程度の初期材齢からポゾラン反応が起こると想定した。本論文では、材齢28日以前に起こるフライアッシュのポゾラン反応を早期ポゾラン反応と定義する。

以上の参考文献は、それぞれの強度増加メカニズムについての実験結果を報告している。

本論文では、微粉末の物理的作用によって細孔組織が緻密になる効果をフィラー効果と称し、再生骨材フライアッシュモルタルの初期材齢時の強度発現に、早期ポゾラン反応とともに、このフィラー効果も寄与していると想定した。

この点を第3章、第4章で詳述する。

1.4 研究の目的

前節で記述の通り、再生骨材コンクリートにフライアッシュを混入した場合、普通骨材コンクリートにフライアッシュを混入した場合よりも強度増加率（無混入コンクリートに対する増加率）が大きいことが明らかになっている。しかしながら、この機構に関しては不明確である。特に、材齢28日より若材齢時において強度増加率が顕著である。フライアッシュはポゾラン物質であり、材齢28日以降の長期材齢時での強度増加は一般的であるが、再生骨材コンクリートとフライアッシュを組み合わせた場合、このポゾラン反応に旧セメントペーストの水酸化カルシウムがどう関わるのかが不明確である。

本研究では、この機構の解明を目的とし、モルタル供試体を用いて、圧縮強度試験、示差熱重量分析試験、基本モルタルと各種微粉末(フライアッシュを含む)混合モルタルとの比較から算出される強度増加率の増減比較、総細孔空隙量

を求める等々の実験的解明を行った。

1.5 本論文の構成

第1章 序論

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

コンクリートを製造するのに、約7割以上の粗骨材・細骨材を使用する。それら天然骨材の入手困難である現状に鑑み、廃コンクリートからなる再生骨材の利用を模索する。

また、石炭火力発電所から産業副産物として産出されているフライアッシュの有効利用について考察する。

次に、再生骨材コンクリート、再生骨材コンクリートにフライアッシュを混入したもの等々、既往の研究をまとめた。さらには、本論文の構成について述べた。

第2章 再生骨材とフライアッシュ

第2章では、再生骨材とフライアッシュについて詳述する。再生骨材の生い立ちとそれら再生骨材を使用するにあたっての品質規格(JIS規格)。

再生骨材を使用したコンクリートの規格。

次に、フライアッシュの生い立ちと品質規格(JIS規格)。各規格に合わせた有効利用の模索などをまとめた。

第3章 再生骨材モルタルの初期から長期材齢までの強度発現に影響を及ぼす鉍物質微粉末のフィラー効果に関する一考察

この章では、モルタル供試体を用いて、想定した二つの仮説の妥当性を検討した。第一に、再生骨材の付着ペースト中の水酸化カルシウムとフライアッシュのポゾラン反応について検討した。具体的には、普通骨材モルタルに対して、フライアッシュと再生骨材微粉末を混合し、強度発現に与える影響を検討した。第二に、再生骨材を用いて4種類のフライアッシュに加えて2種類の不活性な鉍物質微粉末を使用し、セメントに対して外割置換した鉍物質微粉末が再生骨材モルタルの初期材齢から長期材齢にわたる強度発現性状に与える影響を検討した。

第4章 鉍物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発

現メカニズムに関する一考察

前の第3章においては、圧縮強度、示差熱重量分析、普通骨材モルタルの圧縮強度をベースに再生骨材モルタルの強度増加率を考察した。

この第4章では、既往の研究の多くが未解明である初期材齢の強度発現のメカニズムについて、考察した。

第5章 結 語

本章では、本論文で得られた知見をまとめた。

参考論文

- 注 1-1 ポルトランドセメント 1 t 当たりの CO₂ 排出量は、原料の石灰石から 468kg、電力・エネルギー消費量から 296kg、合計 764kg。
鉄鋼スラグ協会
- 注 1-2 松坂祐介・宮崎健治・横井克則・上田隆雄、低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 33、No. 1、2011
- 注 1-3 松下博通・佐川康貴・川端雄一郎、再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下、土木学会論文集 E Vol. 62、No. 1、230-242、2006. 2
- 注 1-4 Shi Cong Kou・Chi Sun Poon・Dixon Chan、Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete、Materials and Structures (2008) 41:1191-1201
- 注 1-5 石山貴英・高巢幸二・松藤泰典、エコセメントとフライアッシュを混合した再生骨材コンクリートの力学性状、コンクリート工学年次論文集、Vol. 31、No. 1、2009
- 注 1-6 原勝哉・橋本親典・石井光裕・牛尾仁・渡辺健・石丸啓輔、廃品コンクリートポールを原コンクリートとする全量再生骨材 L を用いた FA コンクリートの高強度化に関する実験的研究。
- 注 1-7 江口正晃・牛尾仁・橋本親典・石井光裕、廃品ポールを原コンクリートとする全量再生骨材コンクリートの硬化特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 31、No. 1、2009
- 注 1-8 橋本親典・山本恭平・江口正晃・牛尾仁、FA による全量 L 級再生骨材コンクリートの強度および耐久性の改善効果。
- 注 1-9 橋本親典・青井洋視・渡辺健・石丸啓輔、フライアッシュモルタルの早期強度発現に影響を及ぼす再生細骨材に関する実験的検討、第 40 回

セメント・コンクリート研究討論会、論文報告集、pp. 15～pp20、平成 25 年 11 月 15 日

- 注 1-10 山崎寛司、鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究、土木学会論文集 第 85 号、(昭. 37. 9)
- 注 1-11 佐伯竜彦・長瀧重義、フライアッシュと水酸化カルシウムの反応性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No. 51、1997
- 注 1-12 馬越唯好・富加見徳治・武田啓二、フライアッシュを多量使用した高流動コンクリートの基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 22、No. 2、2000
- 注 1-13 遠藤崇司・山本泰彦、モルタルの強度発現に及ぼす鉱物質微粉末の影響に関する研究、土木学会第 58 回年次学術講演会（平成 15 年 9 月）
- 注 1-14 陶山裕樹・小山智幸・松藤泰典、各種紛体を外割混合したコンクリートにおける細孔組織を考慮した圧縮強度に関する検討、コンクリート工学論文集、第 24 巻第 3 号、2013 年 9 月
- 注 1-15 佐川康貴・真壁央稔・濱田秀則・池田隆徳、骨材中の水分が再生骨材コンクリートの強度に及ぼす影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 33、No. 1、2011
- 注 1-16 内川 浩・羽原俊祐・沢木大介、硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討、コンクリート工学論文集、第 4 巻第 2 号、1993 年 7 月
- 注 1-17 加藤佳孝・魚本健人、細骨材の量と比表面積が遷移帯形成に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 20、No. 2、1998
- 注 1-18 小早川 真・黄 光律・羽原俊祐・友澤史紀、水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21、No. 2、1999

第2章 再生骨材とフライアッシュ

2.1 再生骨材とは

コンクリート製造において、その骨材である細骨材・粗骨材は、天然資源の枯渇により採取不可能になり、現在は人工砕石による細骨材・粗骨材を使用している。しかし、リサイクルに関心が向けられている昨今、コンクリートも例外ではなく、各種コンクリート構造物の再構築により大量に排出される廃コンクリートの再利用が考えられている。これまでは廃コンクリートの大部分を破砕し、そのまま道路の地盤に使用したり、また、大型構造物や擁壁などの背面に裏込め材として利用したり、他は廃棄処分として埋め立て等に処分されていた。

わが国における高度経済成長期時代に建設された多くの構造物、その中でもセメントと砂・砂利を使用したコンクリート構造物が多くを占めている。そのコンクリート構造物の寿命の議論が昨今の話題の1つでもある。コンクリート建築物はもちろんのこと、それ以外の構造物、道路・橋梁・防波堤・防潮堤等の維持再生も最近のテーマとして研究が進んでいるが、基本的には再生・再構築の時期に移行せざるをえない。それら建築物・構造物の再生・解体による膨大な量のコンクリート廃棄物の処分をどうするのか。そのコンクリート廃棄物の再利用の方法はどのような方法があるのかを、検討する。

コンクリート構造物を解体して鉄筋等の不純物を取り除いたあとのコンクリート塊を破砕・粉砕して、もとの原材料である砂利(粗骨材)と砂(細骨材)とを取り出す研究が各所で繰り返行われている。古くから考えられている擦り揉み法やごく最近では、カミナリ法(2013年)という新手も出てきた。水中の籠(金属でできたカゴはアースの役割を担当する)に廃コンクリートの塊を入れ、大容量のコンデンサーに蓄電した電力を瞬時に放電し、カミナリに近い衝撃電流を複数回放電すると、その都度カミナリ同様の衝撃爆裂音が発生し、セメントペーストと細骨材・粗骨材が分離する。カゴの目の大きさにより、自然と細骨材と粗骨材とに分離もでき重宝である。とはいえ、電流を衝撃放電するための巨大なコンデンサーの寿命が今後の課題であると開発者の言であった。費用対効果の観点からは、実験室の研究段階からはとても脱却できる段階には至っていない。

2.1.1 再生骨材の品質規格(JIS規格)

これら廃コンクリートの利用方法の模索から、一歩進んで、再生骨材および再生骨材を用いたコンクリートのJIS規格が2005年～2007年にかけて制定された。

まず、はじめに再生骨材（注 2-1 コンクリート標準示方書 2010 年制定）から記す。

(a) コンクリート用再生骨材H ^{注 2-1)}

はじめに、この規格は、構造物の解体などによって発生したコンクリート塊に対し、破砕、磨砕、分級等の高度な処理を行って製造したコンクリート用再生骨材Hについて規格する、とある。

種類は、再生粗骨材Hと再生細骨材Hとがあり、原コンクリートに対し、破砕、磨砕等の高度な処理を行い、とある。

また、粒度による区分、アルカリシリカ反応性による区分、不純物量についての規定、物理的性質、アルカリシリカ反応性、粒度、粗粒率、隣接するふるいに留まる量、粒形、塩化物量、製造等きめ細かく規定されている。

再生骨材Hは、普通骨材と同様に取り扱ってもよいが、その製造過程に問題がある。規定には、高度な処理を行いとあり、この方法についていくつもの製造方法が考案されている。再生骨材Hの製造には、廃コンクリート塊を「加熱・擦り揉み工法」として、多くの労力とエネルギーを消費する。廃コンクリート塊を 300 ～400 ℃に加熱し、原粗骨材とモルタルとの熱膨張率の違いを利用して剥離をうながし、粉砕していく。その過程で約 50 % もの廃棄微粒分が排出される。今度はこの廃棄微粒分の処分方法を考えなければならない。川砂利・海砂等天然骨材の枯渇を言われて久しいが、それでも天然骨材である碎石・砕砂の普及が一般化されていて安価に入手できるので、再生骨材Hの生産はほとんどされていないのが現状である。

(b) コンクリート用再生骨材M ^{注 2-1)}

このMの規格は、再生粗・細骨材は、原コンクリートに対し、破砕、磨砕等の処理を行い、とあり、高度なという文言がない。

表-2-1 にコンクリート用再生骨材M（JIS A 5022：2007 附属書 A 規定）の物理的性質を示す。

再生骨材Mは、再生骨材Lと比べて、絶乾密度が決められているのと吸水率が厳しくなっているところである。密度は重さに関係するので、コンクリート骨材としては重要な要素となる。この再生骨材Mクラスを利用したコンクリートの開発に企業も取り組み始めている。

(c) コンクリート用再生骨材L ^{注 2-1)}

表-2-2 にコンクリート用再生骨材L（JIS A 5023：2006 附属書 1 規定）の品質を示す。

再生骨材Lは、再生骨材の中では一番規制が緩和されているとはいえ、やは

表-2-1 再生骨材Mの物理的性質		
試験項目	再生粗骨材M	再生細骨材M
絶乾密度 (g/cm ³)	2.3以上	2.2以上
吸水率 (%)	5.0以下	7.0以下
微粒分量 (%)	1.5以下	7.0以下

表-2-2 再生骨材Lの品質		
試験項目	再生粗骨材L	再生細骨材L
吸水率 %	7.0以下	13.0以下
微粒分量 %	2.0以下	10.0以下

り構造物の主要な部分を構成するコンクリートに使用するのであるから、その使用には注意しなければならない。現在のところ、再生骨材Lの建築物への使用は行われていない。また、全国の海岸線沿いに設置されたテトラポットや、防潮堤・防波堤などもすでに出来上がっている様子ではあるが、それらによく似た何か重量を重視する構造物に利用できないかと提案する。今回の東日本大震災により発生したガレキのコンクリートは、放射能帯びは別として、海岸線の防潮・防波堤に再利用できるのではとも思う。強度的には各種の実験によりJIS 基準をクリアしている。ただし、海岸線沿いや寒冷地の凍結防止剤の塩化カリウム・塩化カルシウムが含まれている原コンクリートには鉄筋が使用できないので注意が必要である。

2.1.2 再生骨材を用いた再生骨材コンクリート

(a) 再生骨材Mを用いたコンクリート JIS A 5022 :2007

この規格は、構造物の解体などによって発生したコンクリート塊に対し、破碎、磨砕、分級等の処理を行い製造したコンクリート用再生骨材M及びそれを骨材の全部、又は一部に用いたコンクリートについて規定する、とある。

コンクリート構造物を解体したコンクリート塊の再利用率は96%を超えているが、用途は舗装用の路盤材及び埋戻し材・裏込め材が主なものであり、コンクリート構造物にはほとんど使用されていない。今後、コンクリート用再生骨材としてより積極的にコンクリートに用いていくため、この規格を制定した。

(b) 再生骨材Lを用いたコンクリート JIS A 5023 :2006

この規格は、構造物の解体などにより発生したコンクリート塊を破碎して造ったコンクリート用再生骨材Lを骨材の全部または一部に用いたコンクリートについて規定する。

標準品は裏込めコンクリート、間詰コンクリート、なら(均)しコンクリー

ト、捨てコンクリート等の、高い強度・高い耐久性が要求されない部材及び部位に使用する。また、標準品は通常高い凍結融解抵抗性を要求するのが難しいため、凍結融解作用を受けない部材及び部位に使用する。さらに、再生骨材Lの原骨材を特定するのは多くの場合に困難であり、アルカリシリカ反応抑制対策を行う必要がある。したがって、アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用することが前提となる。

なお、塩分規制品は標準品と同様な部材及び部位に使用する。

2.2 フライアッシュとは

2.2.1 フライアッシュ（FA）の生い立ちについて

我が国における石炭火力発電所の現状と今後の計画について^{注2-2)}

石炭は我が国の総合エネルギー政策の中で原子力発電と並ぶ石油代替エネルギーの重要な柱と位置付けられており、第2次オイルショック以降石油から石炭へと転換が進み、2008年度末における石炭火力発電所数は85基（そのほかに建設中5基、建設準備中1基）を数え、電源構成比では15.7%を占め、発電電力量比率では同じく2008年度末で25.2%を占めている。2度にわたる石油危機以降、エネルギー源の多様化が議論され、石炭に対し大きな期待がかけられるようになった。今後約20年間の見通しとして、石油36%、石炭20%、原子力20%を目標にしている。

蛇足で昔に返るようだが、ダム式水力発電が温帯モンスーン気候地帯に向いているように思う。黒部ダムや早明浦ダムがどれほど有益に働いているか再検討してもよいと思う。台風時の大雨を海に捨てず、各地にダムを建造すれば太陽光発電よりも安定した力強い電力量があると思う。原子力発電は実用化するまでに永年研究された夢の発電システムではあるが、事故の被害量は人間の能力を超えている。事故現場から半径30km以内は近寄れない。その上、現時点の技術では人間が住める地域修復には数十年を要するという。なぜなら、広島や長崎の原爆による放射能汚染は、一瞬にして爆発後は発生増加していない。それに対して、チェルノブイリや福島事故では今でも放射能を発生し続けている。西暦2016年、平成28年4月、チェルノブイリ事故後30年経過したと報道していた。その内容は、屋上屋を重ねる方法で蓋をする予定という。そして、今も160tもの発熱し続けているウランがあるという。ウランから発生し続けている放射能は根本的な解消方法は見つからず、手つかずのままである。福島においても同じである。関係者は、今後修復には50年から60年くらいかかるであろうと他人事のように平然としている。その上、どれくらいの量のウランが

あるのか一切公表していない。今なお市や町単位で耕作不能農地がある。

2.2.2 石炭の物性

(a) 石炭の物理的性質

石炭の物理的性質を表すものとして密度、光沢、反射率、湿潤性、孔げき率、硬度、粉碎性、比熱、流動性、粘結性、コークス化性などがある。

(1) 密度 ----- 石炭の密度は一般に 1.3g/cm^3 前後である。

(2) 粉碎性 ---- 石炭の粉碎性は一般に石炭化度の進むにつれて大きくなる。
近年微粉炭燃焼炉の増加に伴い、石炭の粉碎性が問題とされるようになった

(3) 流動性 ---- 粘結炭を加熱すると、 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 付近で軟化し、流動現象を示す。この性質を石炭の流動性という。

(4) コークス化性 ---- 石炭を加熱・乾留する際の粘結・膨張現象により製造。

(b) 石炭の化学的性質

石炭の化学的性質を表わすものとしては工業分析値、元素分析値、発熱量などが一般的であるが、近年石炭の液化・ガス化と関連して溶剤抽出性なども重要になってきた。

石炭の工業分析では、水分、灰分、揮発分、固定炭素の 4 成分を定量分析する。

(1) 水分 ----- 水分には大気中の湿気と平衡状態で石炭が吸着している固有水分と、石炭の表面に地下水や雨水が機械的に付着している付着水分がある。付着水分は石炭を商取引する際の重要な要素で、電力用炭で 7%以下と決められている。

(2) 灰分 ----- 灰分は、石炭を空気中で 815°C に加熱したときの残留分をいう。灰分は石炭により相当異なり、その範囲は一般に 5~30% である。灰分と発熱量とは逆相関関係にある。

(3) 揮発分 ---- 石炭を比較的低温で加熱したときの減量の重量割合から固有水分を差し引いたものを揮発分という。揮発分は石炭を加熱したとき生ずるガスの主体で、これは炎を出して燃焼する。

(4) 固定炭素 ---- 水分、灰分、揮発分の和を 100 から差し引いた残りの百分率の値を固定炭素という。

(c) 元素分析 ---- 石炭を構成する主元素は、炭素であるが、それ以外に水素、酸素があり、さらに微量成分として窒素、硫黄などがある。

(d) 発熱量 ---- 単位量の燃料を標準条件で完全燃焼したときに発生する熱

量を発熱量といい、石炭の価値を決定する重要な要素である。

2.2.3 用途による分類

石炭を大きく 2 つに分けて、原料炭(製鉄用)と一般炭(発電所用・ボイラー用)とがある。

2.2.4 形状(粒度)による分類

フライアッシュの成り立ちとしては、この粒度による分類は重要である。

石炭火力発電所に使用されている石炭は大きさによって、3mm 以下から 50mm 以上と 6 段階に分けられているが、発電所で使用されている石炭すべてが微粉炭ばかり(電力会社社員による)とは限らない。3mm 以下の微粉炭がフライアッシュのもととなる。

2.2.5 石炭灰の発生と有効利用

石炭には 5 ～30 % 程度の灰分が含有されているため、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼したあとその残渣として石炭灰が発生する。石炭灰は集塵装置（電気集塵装置：電極にイオンを発生させ帯電した微粉灰を集める）で集められたフライアッシュとボイラー底部で回収される溶結状の石炭灰を砕いたクリンカとに大別される。

フライアッシュの有効利用については、1955 年頃から資源としての有効性が着目されはじめ、当初これをコンクリート混和材とすることから研究がすすめられた。信頼性を特に要求されるダムに活用され始めた。大型ダムコンクリートには発熱低減材として活用され始めた(平成 25 年建設中の香川県小豆島の多目的ダムは、細骨材・粗骨材重量の 20%がフライアッシュである)。また、成分に二酸化ケイ素を 60 % 前後含んでいるため粘土によく似た性質を利用してセメント製造時の原料の一部としても用いられている。これは、セメント原料の 5 % 以内と定められ、また、その製品にはフライアッシュセメントと明記しなければならない。

その後、1970 年代に至り、石油火力が石炭火力にとって替わり、石炭灰の発生量が減り、一時その灰の利用技術開発が停滞したが、2 回の石油危機以降再び石炭が見直された。

現在では、ダム、橋梁、水力・火力・原子力発電所など大型コンクリート構造物に使用されており、また、建材、道路材料、地盤改良材などにも活用されている。

地球環境問題と資源リサイクルの観点から、1991 年には「再生資源の利用の促進に関する法律」（通称リサイクル法）が制定され、石炭灰は指定副産物に定められたことからその有効利用の開発が一層求められる情勢になっている。

他方、石炭火力発電所から通称リサイクル法による指定副産物として排出されているフライアッシュを普通骨材に混練りしたコンクリートは、すでに数多く利用されている。

そこで、フライアッシュと再生骨材とを練り混ぜると、圧縮強度試験において材齢 3 日から 7 日という初期材齢から強度の発現が確認され、同配合の普通骨材よりも強度を上回る結果を得た。このことにより、フライアッシュと再生骨材とを練り混ぜると早期のポゾラン反応が生じた可能性が見受けられる。フライアッシュを混練りした再生骨材コンクリート製造実験の途中で確認されたこの早期ポゾラン反応について、廃コンクリートに残存している水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) や、従来からの未反応セメントのほか各種の微粒分が、新たな練り混ぜ時に加えられたポルトランドセメントの水和反応時に生成された水酸化カルシウムとフライアッシュとが反応した可能性がある。それらを念頭において研究を進めた。

今回の実験で使用したフライアッシュとはセメント製造時に粘土の一部代替品として用いられたり、コンクリートの製造においては、セメントの一部代替結合材として用いたり、細骨材(細砂)への一部代替品として現在すでに利用されている。

最近、循環型社会の形成をめざしたキーワードとして、Eco と Recycle が注目されている。コンクリート業界においてこの 2 つに貢献できるものに廃棄コンクリートの再利用と、石炭火力発電所からの副産物であるフライアッシュを利用した再生骨材コンクリートに関する研究は今後ますます重要性を増すものと予想される。

表-2-3 フライアッシュの種類と品質

項目		フライアッシュ I 種	フライアッシュ II 種	フライアッシュ III 種	フライアッシュ IV 種
二酸化ケイ素 (%)		45.0 以上			
湿分 (%)		1.0 以下			
強熱減量 ¹⁾ (%)		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 (g/cm^3)		1.95 以下			
粉末度 ²⁾	45 μm ふるい残分 (網ふるい方法 ³⁾ %)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (ブレーン法: cm^2/g)	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上
フロー値比 (%)		105以上	95以上	85以上	75以上
活性度指数 (%)	材齢28日	90以上	80以上	80以上	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上
注1) 強熱減量に代えて未燃炭素含有量の測定結果を適用してもよい					
注2) 粉末度は、網ふるい方法またはブレーン方法による					
注3) 粉末度を網ふるい方法による場合は、ブレーン方法を参考値として併記する。					

我が国では、1950 年代前半にフライアッシュセメント・コンクリート分野への利用技術が確立され、1958 年に JIS A 6201 が制定された。その後粉末度が高く、未燃炭素分の少ないフライアッシュがコンクリート用混和材として商品化された。相前後して多くの研究が進められた結果、1999 年の JIS A 6201 の改正では、表-2-3 のように 4 種類に等級化された。

2.3 第 2 章のまとめ

以上、廃コンクリート塊から造られる再生骨材 H、M、L と再生骨材コンクリート M および再生骨材コンクリート L について、JIS 規格からとりあげてみた。

再生骨材といっても内陸部ばかりの廃コンクリートとは限らない。海岸線沿いの構造物とか、寒冷地方では、冬季に融雪剤として使われているものの中には塩化物が多量に含まれているものがある（寒地土木研究所）。故に、再生骨材コンクリート L の規制が緩いとはいえこれだけには塩分規制品として決められている。特に鉄筋を使用する場合には注意しなければならない。また、再生骨材 L の原骨材（廃コンクリート）を特定するのは多くの場合に困難であり、アルカリシリカ反応抑制対策を行う必要がある。したがって、アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用することが前提となる。

参考文献

注 2-1 コンクリート標準示方書(2010) 土木学会編

注 2-2 石炭灰ハンドブック(第 5 版) 日本フライアッシュ協会

第 3 章 再生骨材モルタルの初期から長期材齢までの強度発現に影響を及ぼす鉱物質微粉末のフィラー効果に関する一考察

3.1 はじめに

現在、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の老朽化と更新に伴い、大量のコンクリート塊の発生が予想されている。その廃コンクリート塊を原骨材とする再生骨材のコンクリートへの利用用途拡大が急務となっている。

一方、石炭火力発電所から副産物として発生している多量の石炭灰のなかの1種類であるフライアッシュを、有効利用しようとの研究も行われている。

これまでの著者ら^{注3-1)}の研究において、再生骨材モルタルの細骨材の一部にフライアッシュ(以後、図表にFAと称す)を置換することによって、フライアッシュ無置換のモルタルと比較して、材齢3日や7日程度で強度増加が確認された。そこで、既往の研究(第1章)などを基礎として、それぞれの強度増加メカニズムは異なるが、鉱物質微粉末の物理的作用によって圧縮強度が増加するという点においては、同様の機構であるといえる。本章では、微粉末の物理的作用によって細孔組織が緻密になる効果をフィラー効果と称し、再生骨材フライアッシュモルタルの初期材齢時の強度発現に、早期ポゾラン反応とともに、このフィラー効果も寄与していると想定した。

上述した通り、フライアッシュを外割置換したコンクリートの強度発現機構は、種々の報告があるものの不明な点が多く、未解明である。そこで、本章では、モルタル供試体を用いて、想定した二つの仮説の妥当性を検討した。

第一に、再生骨材の付着ペースト中の水酸化カルシウムとフライアッシュのポゾラン反応について検討した。具体的には、普通骨材モルタルに対して、フライアッシュと再生骨材微粉末を混合し、強度発現に与える影響を検討した。

第二に、再生骨材モルタルに4種類のフライアッシュに加えて、2種類の硬化活性のない鉱物質微粉末を混練りした。外割置換した鉱物質微粉末が再生骨材モルタルの初期材齢から長期材齢にわたる強度発現性状に与える影響を検討した。

3.2 再生骨材微粉末を用いた実験

本節では、再生骨材微粉末(以降、RMPと称す)と試薬特級 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (以降、試薬Caと称す)を混合した普通骨材モルタルを作製した。RMPには旧セメント硬化体の水酸化カルシウムが存在する。フライアッシュを置換した再生骨材モ

ルタルにおいて、RMP や試薬 Ca とフライアッシュが初期材齢から早期ポゾラン反応を起こすと想定した。すなわち、本節では、外割置換したフライアッシュによる強度発現機構に対するポゾラン反応とフィラー効果の寄与の程度について検討した。

3.2.1 使用材料

表-3-1に使用した各種粉体（記号：P）の物理的性質を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。FAは、JIS A 6201に適合するⅡ種を使用した。再生骨材微粉末（RMP）は、単位セメント量が500kg/m³程度の廃品コンクリートポールを破砕・洗浄したのみの低度処理再生粗骨材を一度だけジョークラッシャーに掛け、100μmふるい通過分を絶乾状態で使用した。また、RMPの比較として、JIS K 8575に適合する純度96%以上の試薬特級Ca(OH)₂（試薬Ca）を使用した。表中に示した45μmふるい残分の試験は、JIS A 6201（附属書1）に従った。なお、本来はFAに対する試験方法であるが、FAと粉末度の比較を行うため、RMPおよび試薬Caに対しても同様に行った。また、同様の試験方法で75μmふるい残分の試験も実施した。その結果、RMPおよび試薬Caは、FAと比べて粉末度が小さく、粗粉であった。

細骨材は、大分県津久見産石灰石砕砂（記号：LS、表乾密度：2.68g/cm³、吸水率：0.87%、粗粒率：2.78、微粒分量：4.7%）を使用した。

表-3-1 各種微粉末の物理特性

種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	強熱減量(%)
普通ポルトランドセメント	3.16	3340	
フライアッシュⅡ種 (JIS A 6201適合)	2.29	3890	1.7 ふるい45μm通過 4.8%
再生骨材微粉末	ふるい100μm通過 ふるい75μm残留分20.0% ふるい45μm残留分51.0%		
水酸化カルシウム (試薬特級)	96%以上	ふるい75μm残留分16.8% ふるい45μm残留分42.0%	

3.2.2 配合

表-3-2にシリーズ1（FA無置換モルタル）のモルタルの1回の練り混ぜに使用し

表-3-2 配合 (1回の練混ぜ量 g) (シリーズ1)

配合名	W/C (%)	W/P (%)	1バッチの練混ぜ量 (g)				FA
			W	C	微粉末	石灰石砕砂	
微粉末 0%	50	50	180	360	0	1080	0
微粉末 5%	53		189		18		
微粉末 10%	55		198		36		

表-3-3 配合 (1回の練混ぜ量 g) (シリーズ2)

配合名	W/C (%)	W/P (%)	1バッチの練混ぜ量 (g)					
			W	C	微粉末	Ca(OH) ₂	石灰石砕砂	FA
微粉末 0%	50	50	180	360	0	0	720	360
微粉末 3%	52		185		10.8			
微粉末 5%	53		189		18			
微粉末 10%	55		198		36			
Ca(OH) ₂ 5%	52		185		0	10.8		
Ca(OH) ₂ 10%	53		189			18		

た材料の質量を示す。水粉体比W/Pを50%、砂セメント比S/Cを3.0とした。

RMPは、セメント質量の5%、10%の2水準で混合した。

表-3-3 にシリーズ2 (FA置換モルタル) のモルタルの1回の練り混ぜに使用した材料の質量を示す。シリーズ2の配合は、FA無置換のシリーズ1と比較を行うため、一部対応させた (NとN-FA、RMP5とRMP5-FA、RMP10とRMP10-FA)。FA量はシリーズ1における細骨材質量の1/3の量で一定とし、細骨材代替で置換した。RMPは、セメント質量の3%、5%、10%の3水準で混合した。また、試薬Caは、セメント質量の3%および5%の2水準で混合した。両シリーズとも比較用として、FAやRMPおよび試薬Caを混合しない基準モルタル (NおよびN-FA) を作製した。

なお、表-3-2および表-3-3に示した配合は、練り混ぜ容積は異なる。1バッチあたり供試体 (φ50×100mm) 3本を作製するために使用した材料の量である。

3.2.3 モルタルの練り混ぜおよび供試体の作製

モルタルの練り混ぜは、JSCE-F 505に従い以下の手順で行った。

モルタルミキサーは、容量3ℓの機械練り用練混ぜ機を使用した。まず、練り鉢に水を入れてからセメントおよび各種粉体を投入し、低速（自転速度：140±5rpm）で30秒間練り混ぜる。次の30秒間に細骨材を投入し、ミキサーの回転数を高速（自転速度：285±10rpm）に変えさらに30秒間練り混ぜた後、90秒間休止する。休止の最初の15秒間に練り鉢およびパドルに付着したモルタルをかき落とす。休止が終わった後、高速で60秒間練り混ぜる。練り混ぜ時間は、休止時間も含めて4分である。

本実験では、表-3-2および表-3-3に示した材料の量で各配合3回の練り混ぜを行い、計9本の供試体（ $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ）をJSCE-F 506に準拠し作製した。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

3.2.4 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を使用し、JSCE-G 505に従い行った。試験材齢は、材齢3、7、28日の3水準とし、養生条件は20℃水中養生である。ただし、各材齢で異なるバッチから作製した供試体3本の圧縮強度試験を実施し、その平均値を試験値とした。

(2) 示差熱重量分析

示差熱重量分析 (TG-DTA) によってモルタルの Ca(OH)_2 含有率の測定を行った。分析用試料は、圧縮強度試験後の供試体中心部をコンクリートカッターで切り出し、粗粉碎した後、真空下で大量のアセトンに浸漬した。その後、0.15mm以下に微粉碎し、40℃炉乾燥を24時間行ったものを分析用試料とした。測定条件は、 N_2 フロー環境下で昇温速度10℃/min、温度範囲は20℃から500℃とした。試験材齢は、材齢3日、28日の2水準とした。

3.2.5 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

図-3-1と図-3-2にシリーズ1とシリーズ2の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。

FA無置換のシリーズ2と比較して、細骨材質量の1/3をFAに置換したシリーズ1は、材齢3日から28日の全ての材齢で高い強度となった。一例として、NとN-FAの場合、材齢3日で12N/mm²、材齢28日で25N/mm²以上の強度増加である。同一W/Cに関わらず、これほどの強度増加があった理由としては、細骨材に微粒子であ

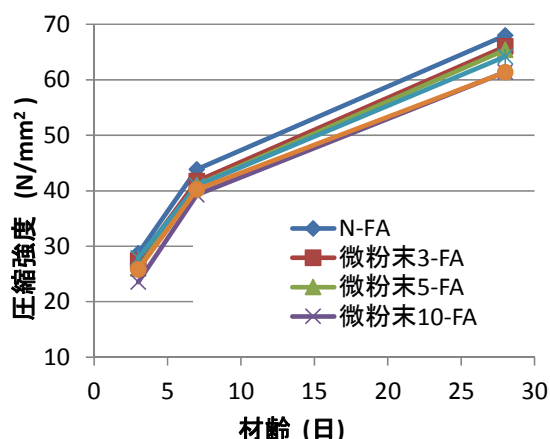


図-3-1 圧縮強度 (シリーズ 1)

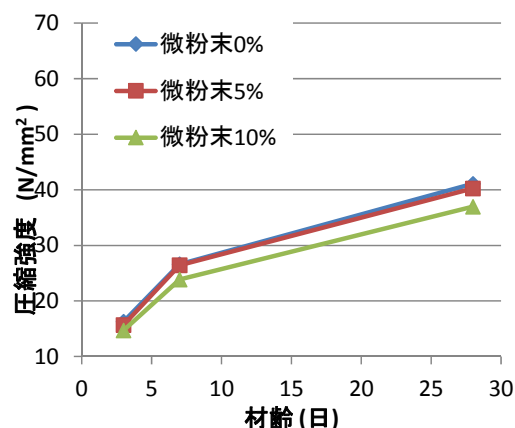


図-3-2 圧縮強度 (シリーズ 2)

るFAを置換したことで、細孔が充填され、物理的に緻密化したことに起因するフィラー効果^{注3-2)、注3-3)}によるものであると考えられる。一方、FAを置換したシリーズ1では、RMPや試薬Caを混合することで、W/Cが大きくなるに従い、N-FAに比べて圧縮強度が低下した。すなわち、RMPに含まれる旧セメント硬化体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とFAが早期ポズラン反応を起こすことによる強度発現は確認

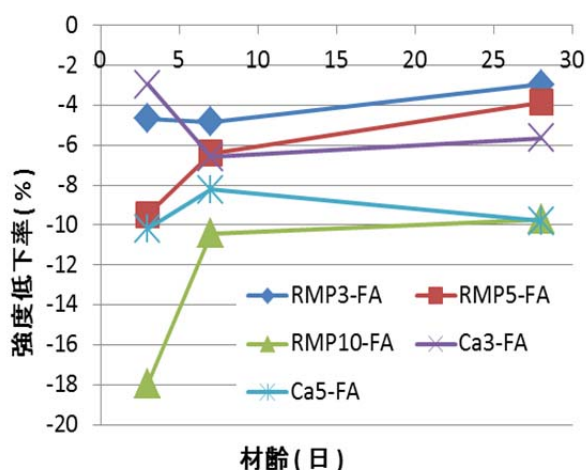


図-3-3 強度低下率 (シリーズ 1)

されなかった。図-3-3にシリーズ1におけるN-FAの圧縮強度を基準として、RMPおよび試薬Caを混合したモルタルの圧縮強度低下率を示す。材齢に関係なく、混合率が増加するに従って強度低下率が大きくなった。

(2) 示差熱重量分析

図-3-4と図-3-5にシリーズ1とシリーズ2の示差熱重量分析によるモルタルの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率と材齢の関係を示す。なお、示差熱重量分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は質量割合である。したがって、本実験では、置換した微粉末によって単位質量中のセメント量が異なるため、含有率の絶対量は比較することができない。しかしながら、各種配合で材齢の進行に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の増減の傾向を比較するには有効であるといえる。

一般に、FAのようなポズラン活性を有する混和材を使用していない場合、セメントの水和反応の進行に伴い $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は増加する。図-3-4に示したシリ

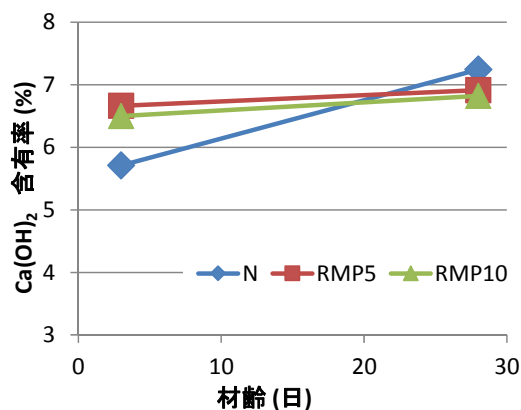


図-3-4 Ca(OH)_2 含有率 (シリーズ 1)

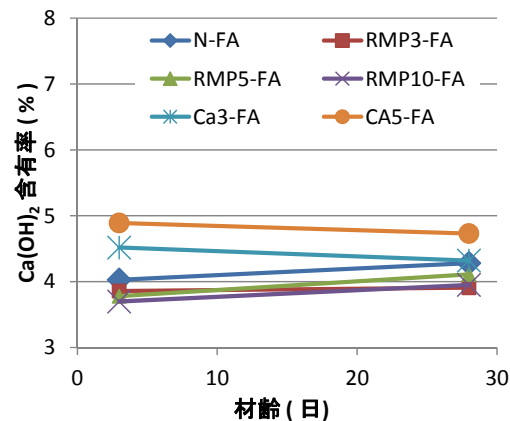


図-3-5 Ca(OH)_2 含有率 (シリーズ 2)

ーズ1は、FAを使用していないため、材齢の進行に伴い増加傾向であった。一例として、Nの場合、材齢3日で5.7%、材齢28日で7.2%であり、1.5%の増加である。

一方、図-3-5に示したFAを置換したシリーズ2では、FAがポゾラン反応を起こすと Ca(OH)_2 を消費する。N-FAの場合、材齢3日で4.0%、材齢28日で4.3%であり、0.3%の増加に留まった。すなわち、図-3-4に示したNと比較して、増加の割合が小さかった。このことから、FAを外割置換したことで、普通骨材モルタルにおいても、材齢28日以前からFAの早期ポゾラン反応が起こり、材齢3日程度の強度発現に寄与している可能性が考えられる。これに関しては、次章において、FA以外の鉱物質微粉末を加えて、フィラー効果とポゾラン反応について検討する。

また、FAに加えて試薬Caを混合した2配合（Ca3-FAおよびCa5-FA）は、材齢3日から28日にかけて減少傾向を示した。これは、試薬CaとFAが早期ポゾラン反応を起こしたことを意味する。しかし、前節の結果より、圧縮強度の増加はなかった。

FAに加えてRMPを混合した3配合（RMP3-FA、RMP5-FAおよびRMP10-FA）は、FA無置換のシリーズ1の2配合（RMP5およびRMP10）と増加の傾向が同様であり、RMPがFAの早期ポゾラン反応に与える影響が小さいと考えられる。

以上の考察により、FAを外割置換した再生骨材モルタルにおける材齢3日程度の強度発現は、FAの物理的作用であるフィラー効果の影響が強く、RMPや試薬Caの影響は小さいと考えられる。しかし、普通骨材モルタルにおいてもFAの早期ポゾラン反応が起こる可能性が示唆された。そこで、次節において、FA以外の鉱物質微粉末を加えて、詳細に検討を行う。

3.3 6種類の鉱物質微粉末を用いた実験

前節において、FAと再生骨材の早期ポゾラン反応による圧縮強度の増加は確認

されなかった。すなわち、FAを外割置換した再生骨材モルタルの材齢28日以前の強度増加は、FAの物理的作用であるフィラー効果であることが明らかとなった。

本節では、FAを含む計6種類の鉱物質微粉末を外割置換したモルタル供試体を作製し、鉱物質微粉末のフィラー効果が再生骨材モルタルの材齢3日から180日までの強度性状に与える影響を検討した。

3.3.1 使用材料

(1) セメント
トおよび鉱物質
微粉末

表-3-4に使用した各種粉体（記号：P）の物理的性質を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。鉱物質微粉末は、ポゾラン活性を有するものとしてFA、ポゾラン活性および水硬性がな

表-3-4 使用材料の物理的性質

種類	記号	物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント
		密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3340cm ² /g
鉱物質 混和材	FA I	Fly ash (JIS A 6201, Type I)
		密度:2.40g/cm ³ 比表面積:5520cm ² /g 強熱減量:1.7%
	FA II	Fly ash (JIS A 6201, Type II)
		密度:2.29g/cm ³ 比表面積:3890cm ² /g 強熱減量:1.9%
	FaIV	Fly ash (JIS A 6201, Type IV)
		密度:2.20g/cm ³ 比表面積:1900cm ² /g 強熱減量:1.9%
	CfFA	High-quality fly ash
		密度:2.25g/cm ³ 比表面積:3342cm ² /g 強熱減量:0.6%
	CC	試薬特級 炭酸カルシウム
		密度:2.72g/cm ³ 比表面積:3420cm ² /g
	Si	試薬特級 二酸化ケイ素
		密度:2.65g/cm ³ 比表面積:1000cm ² /g

いものとして試薬特級炭酸カルシウム微粉末（以後、CaCO₃と称す）および試薬特級二酸化ケイ素微粉末（以後、SiO₂と称す）を使用した。FAは、JIS A 6201に適合するⅠ種、Ⅱ種、Ⅳ種および強熱減量を1%以下に改質したFA（以降、CfFAと称す）の4種類を使用した。

(2) 細骨材

表-3-5に使用した細骨材の物理的性質を示す。再生細骨材は、前節と同様の単位セメント量が500kg/m³程

表-3-5 細骨材の物理的性質

種類	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量*) (%)
再生細骨材	2.32		9.59	6.5
普通砕砂	2.57		1.77	2.5
再生細骨材L のJIS規格			13以下	10以下

*) 0.075mmふるいを通過した割合

度の廃品コンクリートポールを破碎・洗浄したのみの低度処理再生細骨材である。表中に示した物理的性質をJISで区分するとJIS A 5023に該当する再生細骨材L相当である。また、表中のペースト付着率は、濃度約5%の塩酸に再生細骨材を浸漬した後、水洗いの際に0.075mmふるいを通過したものの割合である。なお、再生骨材の原コンクリートである廃品コンクリートポールは、材齢数十年のものから比較的新しいものまで含まれているが、試験に用いた再生細骨材は同一時期に採取したものである。

普通細骨材は、阿波市市場町産砕砂を使用した。

3.3.2 配合

表-3-6 にモルタルの1回の練り混ぜに使用した材料の質量を示す。なお、表-3-6に示した材料の量は、供試体(φ50×100mm)20本を作成する為の量である。配合名の頭文字(R、N)は再生骨材(R)と普通骨材(N)を意味する。また、それに続く記号は、置換した鉱物質微粉末(記号:MP)、数字は置換率を意味する。

再生骨材モルタルの配合は、6種類の鉱物質微粉末を置換率10%、20%、30%(細骨材質量比)で外割置換した。また、各種鉱物質微粉末の置換率の増加に伴い、水粉体比W/Pを50%に一定にするために水量を増加させた。し

たがって、鉱物質微粉末の置換率の増加に伴い水セメント比W/Cは大きくなった。なお、一部の配合に対しては試験練りを実施し、高性能AE減水剤(表中で

表-3-6 1バッチの練混ぜ量(g)

配合名	W/P (%)	W/C (%)	1バッチの練混ぜ量 (g)				Ad P × %	
			W	C	s	MP		
R 10	65	65	1404	2160	6480	0	—	
RFA I 10	50				5832	648	0.25	
RFA II 10								
RFA IV10								
RCfFA 10								
RCC 10								0.5
Rsi 10								
R 20	80	80	1728		6480	0	—	
RFA I 20	50				5184	1296	0.25	
RFA II 20							—	
RFA IV20								
RCfFA 20								
RCC 20							0.5	
Rsi 20							0.25	
R 30	95	95	2052		6480	0	—	
RFA I 30	50				4536	1944		
RFA II 30								
RFA IV30								
RCfFA 30								
RCC 30								
Rsi 30								
N 20	80	80	1728		6480	0	—	
NFA I 20	50				5184	1296		
NFA II 20								
NFA IV20								
NCfFA 20								

はAdと称す、主成分はリグニンスルホル酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体)を添加した。

普通骨材モルタルの配合は、 CaCO_3 および SiO_2 を除く4種類の鉱物質微粉末を置換率20%（細骨材質量比）で外割置換した。

また、再生細骨材の吸水率は9.59%と高い吸水率である。そのため、表乾状態の管理が困難であった。したがって、本実験では、再生細骨材および普通細骨材は絶乾状態で使用することで統一した。

3.3.3 モルタルの練混ぜおよび供試体の作製

モルタルの練混ぜおよび供試体の作製は、前節と同様にJSCE-F 505、JSCE-F 506に従って行った。なお、モルタルミキサーは、容量200の機械練り用練混ぜ機を使用した。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

3.3.4 試験項目

本節ではJSCE-G 505に従って圧縮強度試験を行った。ただし、各材齢で同一バッチから作製した供試体3本の圧縮強度試験を実施し、その平均値を試験値とした。また、圧縮強度試験には鋼製キャップ（φ50mm）を使用した。試験材齢は、材齢3、7、28、56、91、180日の6水準であり、養生条件は、20℃水中養生である。

3.3.5 圧縮強度試験結果および考察

(1) 再生骨材モルタルの置換率10%

図-3-6に各種鉱物質微粉末を置換率10%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。

材齢3日や7日では、すべての配合において鉱物質微粉末無置換の基準配合R10と同程度の圧縮強度であり、強度増加は確認されなかった。2節の実験において、FAを細骨材質量の1/3に置換した場合とは異なり、鉱物質微粉末の置換率が10%と低置換率である場合、強度増加は確認できなかった。

不活性な微粉末であるうえ、比表面積が $1000\text{cm}^2/\text{g}$ と小さい SiO_2 は、全ての材齢で基準配合よりも強度が低下した。また、不活性な微粉末であるが比表面積がFAとほぼ同等な CaCO_3 は、材齢7日まではFA系の強度とほぼ同等であった。

ポゾラン活性を有する4種類のFAは、材齢28日以降の長期材齢において、ポゾラン反応による強度増進が確認された。特に、比表面積が最も大きいFAⅠ種は、最も高い圧縮強度を示した。すなわち、置換率10%の低置換率でも、ポゾラン反応による強度増進は期待できるといえる。ただし、初期材齢に期待されるフィラー効果はなかった。

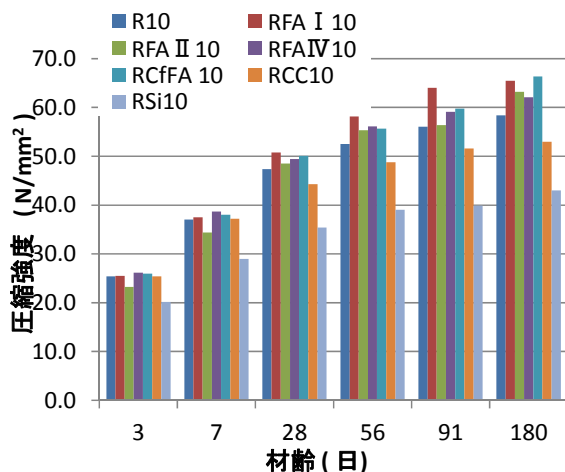


図-3-6 再生骨材モルタルの圧縮強度
(置換率 10%)

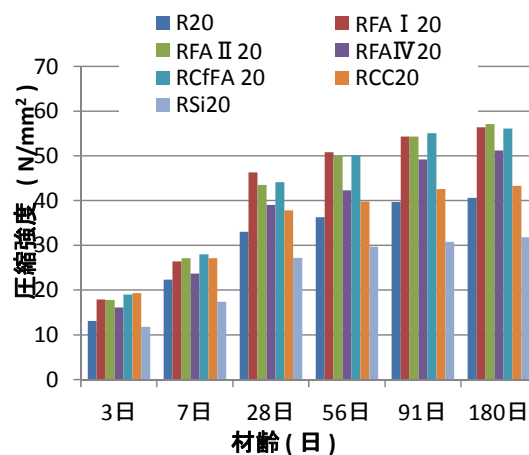


図-3-7 再生骨材モルタルの圧縮強度
(置換率 20%)

(2) 再生骨材モルタルの置換率20%

図-3-7に各種鉱物質微粉末を置換率20%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。置換率20%では、W/Cが80%となる。置換率10%と比較して、基準配合R20の圧縮強度は6材齢ともすべて低下した。

比表面積の小さいSiO₂は、置換率20%においても強度増加はなく、基準配合よりも低い強度であった。

一方、CaCO₃やFAを置換した配合は、基準配合に対して強度増加が確認された。特に、不活性な微粉末であるCaCO₃においても強度増加が確認された。CaCO₃を置換したことによる強度増加は、ポズラン反応や水硬性では説明できない。したがって、フィラー効果^{注3-2)、注3-3)}等の物理的作用が寄与していることが推察される。

4種類のFAは、材齢3日や7日では、CaCO₃と同等の強度を示し、材齢28日では4種類のFAがCaCO₃の強度を大きく上回った。これは、FAのポズラン反応によるものであると考えられる。このことから、一般に材齢28日以降と説明されるFAのポズラン反応^{注3-4)}が材齢28日以前にすでに起こっている可能性が示唆される。したがって、FAを外割置換した再生骨材モルタルは、材齢7日以前はCaCO₃と同様のフィラー効果によって圧縮強度が増加し、その後の材齢では、ポズラン反応によってさらに強度増進するといえる。

(3) 再生骨材モルタルの置換率 30%

図-3-8に各種鉱物質微粉末を置換率30%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。

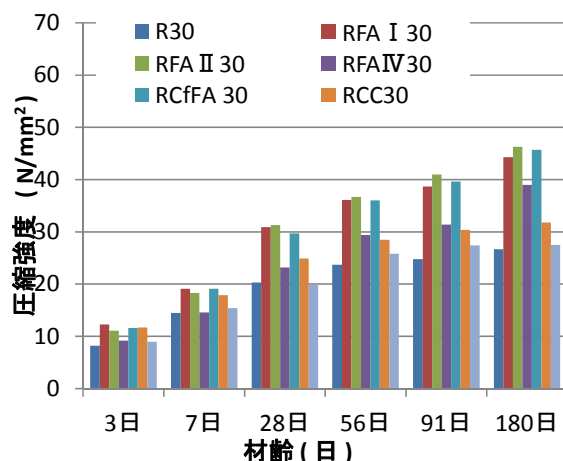


図-3-8 再生骨材モルタルの
圧縮強度（置換率 30%）

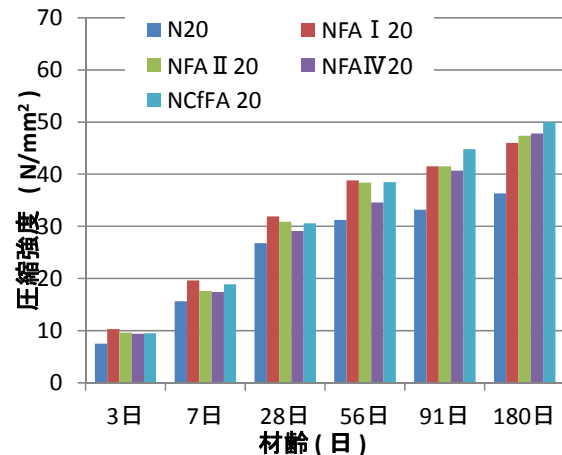


図-3-9 普通骨材モルタルの
圧縮強度（置換率 20%）

置換率 30%では、W/C が 95%と大きくなり、置換率 20%の場合よりもさらに 6 材齢とも低下した。置換率 30%では、比表面積の小さい SiO_2 においても、基準配合 R30 に対して強度が増加した。したがって、フィラー効果は、W/C が大きく、低強度であるコンクリートにおいて、より効果が期待できる可能性が示唆される。

(4) 普通骨材モルタルの置換率20%

図-3-9 に 4 種類の FA を置換率 20%で外割置換した普通骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。一般に、同一 W/C であれば、再生骨材モルタルよりも普通骨材モルタルの方が圧縮強度は高い。しかしながら、同一 W/C の再生骨材モルタルである図-3-7 と比較すると、普通骨材モルタルの強度が低い。これは、普通細骨材の 5 倍以上の吸水率である再生細骨材を絶乾状態で使用したため、配合上の W/C が同じであっても、骨材の吸水率の違いにより、再生骨材モルタルの見かけの W/C が低下したためである。

普通骨材モルタルにおいても、材齢 3 日から FA のフィラー効果による強度増加が確認できる。また、材齢 28 日以降の長期材齢においては、FA 置換によってポズラン反応による強度増加が確認でき、再生骨材モルタルと同様の強度性状を示した。ただし、図-3-7 と図-3-9 を比較すると、FA を置換していない基準配合の強度に対する FA を置換したモルタルの強度の増加割合は、普通骨材モルタルの方が小さいと言える。次節で詳細に検討する。

3.3.6 強度増加率による考察

本章では、強度増加率として、以下に示す式(1)を定義した。

$$\text{強度増加率}(\%) = \{(A - B) / B\} \times 100 \quad (1)$$

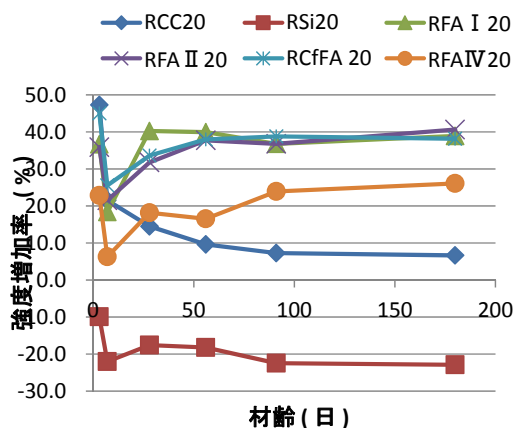


図-3-10 再生骨材モルタルの
強度増加率 (置換率 20%)

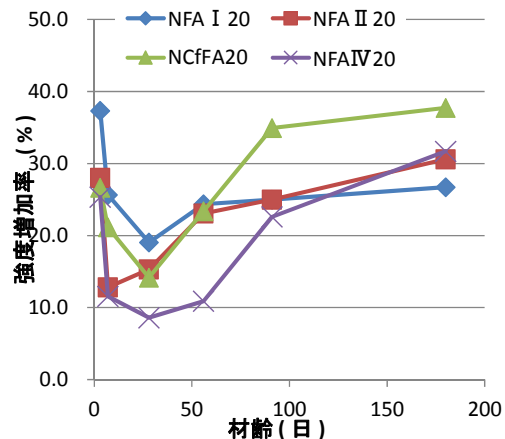


図-3-11 普通骨材モルタルの
強度増加率 (置換率 20%)

ここに、A：所定の材齢の微粉末を置換したモルタルの圧縮強度、B：所定の材齢の基準配合の圧縮強度である。本節では、置換率20%で微粉末を置換した再生骨材モルタルと普通骨材モルタルについて、強度増加率によって考察した。

(1) 再生骨材モルタルの置換率20%

図-3-10に各種鉱物微粉末を置換率20%で外割置換した再生骨材モルタルの強度増加率を示す。

SiO₂は材齢3日から180日の全ての材齢において負の値であった。これは、SiO₂を置換したことで基準配合R20に対して強度低下したことを意味する。

材齢3日の強度増加率は、SiO₂を除いた5種類の微粉末すべてが高い値を示し、材齢7日にかけて減少傾向を示した。これは、遠藤ら^{注3-2)}が報告した普通骨材コンクリートでのフィラー効果と同様な傾向である。すなわち、フィラー効果は、セメントの水和反応が不十分で、低強度である初期材齢ほど著しく、材齢の進行に伴ってセメントの水和反応による強度が支配的となるといえる。

一方、材齢28日での傾向はFAとCaCO₃では異なった。CaCO₃は材齢7日に続いて減少したが、4種類のFAは材齢28日で上昇した。これは、再生細骨材の付着ペースト中のCa(OH)₂とFAがポズラン反応することによって、材齢28日以前に強度増進したことに起因すると考えられる。なお、絶乾状態で使用した再生細骨材の高い吸水率の影響によって、セメントペースト中のアルカリ濃度が高くなった可能性も考えられるが、表乾状態の再生細骨材を使用した既往の報告^{注3-5)}においても同様の結果が報告されているため、付着ペースト中のCa(OH)₂の影響が強いと考えられる。

(2) 普通骨材モルタルの置換率20%

図-3-11に各種鉱物質微粉末を置換率20%で外割置換した普通骨材モルタルの強度増加率を示す。再生骨材モルタル（図-3-10）と同様に、材齢3日に高い強度増加率を示し、材齢7日にかけて減少傾向を示した。つまり、フィラー効果が初期材齢ほど大きく、材齢に従って低下するという遠藤ら^{注3-2)}の報告と一致した。一方、材齢28日の強度増加率がFAⅡ種を除いて最も低い値を示した。この傾向は再生骨材モルタル（図-3-10）とは異なる。普通骨材モルタルにおいては、FAのポズラン反応は材齢28日以降^{注3-4)}であるため、材齢28日では強度増加率が減少傾向のままになったと思われる。したがって、材齢28日以前にポズラン反応による強度増進が期待できるのは、再生骨材モルタル特有の現象であるといえる。

(3) 強度増加率の相関

4種類のFAを置換率20%で置換した再生骨材モルタルと普通骨材モルタルにおける強度増加率の相関を材齢3日、7日、28日の初期材齢（図-3-12）と、材齢56日、91日、180日の長期材齢（図-3-13）に分けて示す。図中に示した破線は、再生骨材モルタルと普通骨材モルタルが同じ強度増加率であることを意味する。したがって、この破線上より上側に位置することは、FA置換による強度増加率が普通骨材モルタルよりも再生骨材モルタルの方が大きいことを意味する。

図-3-12および図-3-13において、材齢に関係なく、大半のデータが破線上またはそれより上側に位置する。これは、FAを置換したことによる強度増加率が普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きいことを意味する。したがって、材齢3日や7日におけるFAのフィラー効果およびその後の材齢におけるポ

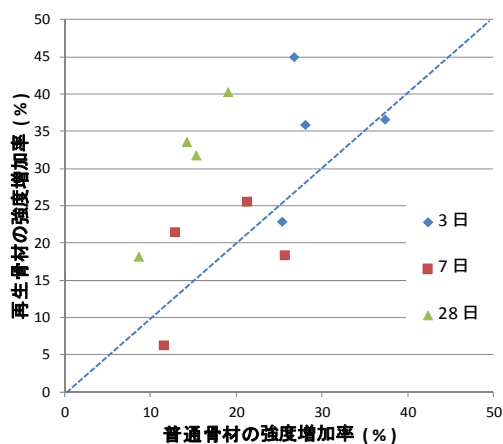


図-3-12 強度増加率の相関
(材齢 3 日～28 日)

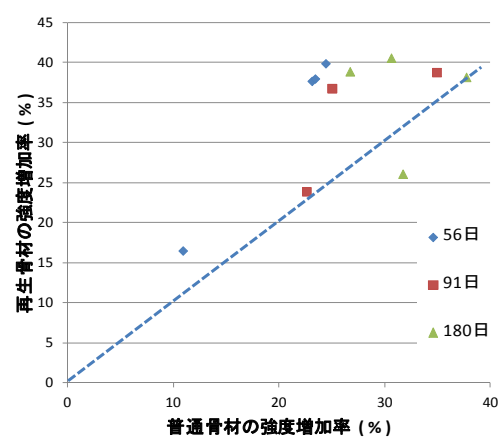


図-3-13 強度増加率の相関
(材齢 56 日～180 日)

ポズラン反応による強度増加の程度は、普通骨材モルタルよりも再生骨材モルタルの方が大きいといえる。

再生細骨材表面は、付着ペーストの存在によって疎な微細構造になっていると考えられる。したがって、新セメントペーストとの界面に存在する遷移帯は、普通骨材モルタルよりも脆弱な層となる。再生細骨材の一部をFA等の鋳物質微粉末に置換することで、粗な遷移帯を含む細孔組織を緻密にし、強度増加につながったものと考えられる。

ただし、本実験で使用した再生細骨材は、高強度のコンクリートポールが原コンクリートである。セメントリッチなセメントペーストが付着していたと考えられる。今後は、異なる再生細骨材を使用したデータの蓄積が必要であると思われる。

3.4 第3章のまとめ

本章は、第一にFAを外割置換した再生骨材モルタルの早期ポズラン反応について実験的検討を行った。次に、4種類のFAを含む計6種類の鋳物質微粉末が再生骨材モルタルの初期材齢から長期材齢にわたる強度性状に与える影響を検討した。本実験の範囲内で得られた結論を以下に記す。

- (1) 再生骨材微粉末を使用した実験の結果、再生骨材微粉末中の Ca(OH)_2 がFAのポズラン反応に与える影響は小さかった。
- (2) FAを含む6種類の鋳物質微粉末を用いた実験の結果、FAを外割置換した再生骨材モルタルは、材齢3日や7日程度の初期材齢では、微粉末の物理的作用であるフィラー効果によって強度増加することが明らかとなった。さらにその後の材齢では、FAのポズラン反応による強度増進が期待できた。
- (3) 鋳物質微粉末によるフィラー効果は、W/Cが大きい低強度モルタルほど著しく、初期材齢ほど顕著であった。また、材齢の進行に伴って、フィラー効果による強度増加は小さくなった。ただし、比表面積の小さい鋳物質微粉末はフィラー効果がなかった。
- (4) FAを外割置換した再生骨材モルタルでは、付着ペースト中の Ca(OH)_2 の影響を受けて、普通骨材モルタルよりもポズラン反応による強度発現時期が早かった。
- (5) FAのフィラー効果およびポズラン反応による強度増加率は、普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きかった。

参考文献

- 注 3-1 青井洋視ほか、再生骨材 L 級コンクリートの簡易長さ変化量特性と急速凍結融解特性に影響を及ぼすフライアッシュの効果、日本材料学会四国支部学術講演会講演論文集、Vol. 9、pp. 33-34、2011
- 注 3-2 遠藤崇司・山本泰彦、モルタルの強度発現に及ぼす鉱物質微粉末の影響に関する研究、(V163)、土木学会第 58 回年次学術講演会第 V 部門、pp. 325-326、2003
- 注 3-3 陶山裕樹ほか、各種紛体を外割混合したコンクリートにおける細孔組織を考慮した圧縮強度に関する検討、コンクリート工学論文集、Vol. 24、No. 31、pp. 89-99、2013
- 注 3-4 小早川真ほか、水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21、No. 2、1999
- 注 3-5 永野哲平・橋本親典・渡辺健・青井洋視、鉱物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現メカニズムに関する一考察、セメント・コンクリート論文集、Vol. 37、No. 1、pp. 1405-1410 (2015)

第 4 章 鋇物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現メカニズムに関する一考察

4.1 はじめに

近年、コンクリート業界でも資源循環や環境負荷低減が重視されるようになり、産業副産物由来の材料である再生骨材やフライアッシュ（以降、FA と称す）の利用に関する研究が活発化している。

一般に低品質な再生骨材を用いた再生骨材コンクリートは強度及び耐久性が低下する。しかしながら、低品質な再生骨材であっても適材適所に利用していくことが必要である。著者らは、再生骨材コンクリートの性能低下を FA で改善するための検討を行っている。FA をコンクリートに混合する方法としては、セメントの一部に置換する内割混合と、単位セメント量を保持して骨材の一部に置換する外割混合がある。FA の混和材としての利用は、これまでにダムコンクリートなどで多くの実績を残してきたが、一般にはコンクリートの水和発熱の抑制やワーカビリティの向上を目的として内割混合されるため、初期強度の低下等の懸念があった。一方で、単位セメント量を保持できる外割混合では、たとえ粉体に水硬性がない場合でも材齢初期から圧縮強度が増加するという報告が著者ら^{注 4-1)}の他、山崎^{注 4-2)}や陶山ら^{注 4-3)}が報告している。しかしながら、粉体を外割混合したコンクリートの初期強度発現メカニズムに関しては不明な点が多く、解明されていないのが現状である。また、この種の研究はこれまで普通骨材コンクリートを対象に行われてきており、再生骨材コンクリートに対しての報告は少ない^{注 4-4)}。本章では、初期強度増加の要因をフィラー効果と定義し、各種鋇物質微粉末を用いることで再生骨材コンクリートの初期強度増加に寄与するフィラー効果のメカニズムに関して実験的検討を行った。

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料

(1) セメントおよび鋇物質微粉末

表-4-1 に実験に使用したセメント、鋇物質微粉末及び化学混和剤を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。鋇物質微粉末として FA、シリカフューム（以降、SF と称す）、石灰石微粉末（以降、LSP と称す）、試薬二酸化ケイ素微粉末（以降、Si と称す）の 4 種類を使用した。FA は JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）のⅡ種に適合する品質である。LSP は比表面積が $6670\text{cm}^2/\text{g}$ であり、FA よりも比表面積が大きいものを使用した。Si は一般にコ

ンクリート用混和材として使用されていない。しかし、ポゾラン活性や水硬性がない微粉末であり、強度増加メカニズムを解明するための比較対象微粉末材料として使用した。

(2) 細骨材

本実験で使用した再生細骨材は、単位セメント量 $483\text{kg}/\text{m}^3$ 、セメント比 30%、細骨材率 41%の廃品コンクリートポールを破碎・洗浄し、5mm ふるい通過分を全量使用した低度処理のものである。表-4-2 に細骨材の物理的性質を示す。物理的性質をJISで区分すると、再生骨材 L 相当であった。また、表中のペースト付着率は、約 5%の塩酸に再生細骨材を浸漬した後、水洗いの際に 0.075mm ふるいを通過したものの割合を示したものであり、以下の式[1]で算出した^{注 4-5)}。

$$\text{ペースト付着率}(\%) = B/A \times 100 \quad [1]$$

ここに A : 塩酸処理前の試料の重量(g)

B : 塩酸処理後の重量減少(g)

普通細骨材は、JIS R 5201 (セメント強さ試験) に用いられる標準砂を使用した。図-4-1 に細骨材の細孔径分布を示す。再生細骨材 (RS) は普通細骨材 (NS) に比べて細孔容積が大きいことが分かる。再生細骨材の付着ペーストのポーラスな微細構造が影響していると考えられる。一方、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の粗大な細孔量

表-4-1 使用材料の物理特性

材料	記号	種類および物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: $3.16\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $3330\text{cm}^2/\text{g}$
鉱物質微粉末	M.Ad.	FA フライアッシュ II 種 (JIS A 6201) 密度: $2.31\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $4080\text{cm}^2/\text{g}$
		SF シリカフューム 密度: $2.32\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $19100\text{cm}^2/\text{g}$
		LSP 石灰石微粉末 密度: $2.72\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $6670\text{cm}^2/\text{g}$
		Si 試薬二酸化ケイ素微粉末 (JIS K 8885) 密度: $2.65\text{g}/\text{cm}^3$, 比表面積: $1000\text{cm}^2/\text{g}$
化学混和剤	Ad1	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系
	Ad2	AE剤 アルキルエーテル系
	Ad3	空気量調整剤 ポリアルキレングリコール誘導体

表-4-2 使用材料の物理特性

試験項目	試験方法	普通細骨材	再生細骨材	再生細骨材 L のJIS規格 (JIS A 5023)
表乾密度 (g/cm^3)	JIS A 1109	2.65	2.32	—
絶乾密度 (g/cm^3)		2.64	2.30	—
吸水率 (%)		0.42	9.59	13.0以下
微粒分量 (%)	JIS A 1103	—	2.1	10.0以下
実積率 (%)	JIS A 1104	66.7	56.5	—
付着ペースト率 (%)	—	—	37.2	—

は、普通細骨材の方が高かった。
したがって、本実験で使用した
再生細骨材表面は、普通細骨材
より微細な空隙が多いといえる。

4.2.2 配合

モルタルの配合を表-4-3 に示
す。水セメント比 50%、砂セメン
ト比は容積比で 3.0 とした。鉱
物質微粉末無混合の R0、N0 を基
準配合として、細骨材容積の 20%
または 30%を 4 種類の鉱物質微粉
末で容積置換した再生骨材モル

タル、普通骨材モルタルを作製した。全ての配合で空気量が $3.0 \pm 1.0\%$ となるよ
うに AE 剤（記号：Ad2）及び空気量調整剤（記号：Ad3）を添加した。高性能 AE
減水剤（記号：Ad1）は、試験練りによって型枠への打込みが困難な配合に関し
て添加した。なお、表中に示すフロー値の範囲内において材料分離は発生せず、
モルタルを型枠内に充填することが可能であった。

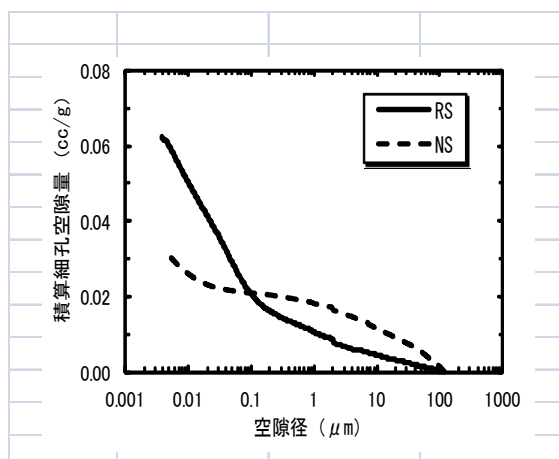


図-4-1 細骨材の細孔径分布

表-4-3 モルタルの配合

配合名	骨材	置換率	W/C	(S+M.Ad.)/C	単位量 (kg/m³)				化学混和剤 (P×%)			フロー値	空気量
		(%)	(%)	(Vol.)	W	C	S	M.Ad.	Ad1	Ad2	Ad3	(mm)	(%)
R	再生	0	50	3.0	283	566	1247	0	－	0.008	－	221	3.0
RFA20		20					998	248	－	0.024	－	194	3.0
RSF20								249	2.0	－	0.008	150	3.0
RLSP20								292	0.25	－	－	213	3.5
RSi20								285	－	－	0.006	201	2.5
RFA30								372	0.5	－		185	3.5
RSF30		30					873	374	4.0	－	0.03	170	3.0
RLSP30								439	0.5	－	0.02	208	2.5
RSi30								427		－		210	3.0
N								普通	0	50	3.0	283	566
NFA20	20	1135	248	－	0.016	－	202		3.0				
NSF20			249	2.0	－	0.006	157		3.5				
NLSP20			292	0.25	－		216		2.5				
NSi20			285		－		198		3.5				
NFA30			30	994	372	0.5	－		0.02				
NSF30	374	4.0			－	165	5.0						
NLSP30	439	0.25			－	0.01	182		3.5				
NSi30	427				－	0.02	170		5.5				

4.2.3 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、所定の材齢まで 20℃水中養生を行った後実施した。供試体寸法は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体であり、試験材齢は、材齢 1、3、7、14、28、56 及び 91 日の 7 水準である。

(2) 示差熱重量分析

示差熱重量分析 (TG-DTA) によってモルタルの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の測定を行った。測定条件は、 N_2 フロー環境下で昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 、温度範囲は室温から 500°C である。ここで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率とはモルタル硬化体中に占める $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の質量割合 (%) である。試料はコンクリートカッターを用いて供試体中心部から切り出した。試験材齢は、圧縮強度試験と同様の 7 水準である。

(3) 細孔径分布測定

細孔径分布の測定は、孔径 1nm まで計測可能な水銀圧入式ポロシメータを用いて行った。試料は所定の材齢でコンクリートカッターを用いて供試体中心部を切り出し、2.5mm～5.0mm に粒度調整を行った。試験材齢は、圧縮強度試験と同様の 7 水準である。なお、細孔径分布の測定は、置換率 20%の再生骨材モルタル及び普通骨材モルタルに対して行った。

4.3 実験結果及び考察

4.3.1 圧縮強度

図-4-2 に再生骨材モルタル、図-4-3 に普通骨材モルタルの圧縮強度試験結果を微粉末の種類ごとに示す。

再生骨材モルタル (図-4-2) において、SF 混合モルタルは材齢 1 日から 91 日までの全ての材齢で基準配合 R0 に対して強度増加が確認され、他の 3 種類の微粉末を混合したモルタルよりも明らかに高い圧縮強度を示した。これは、SF の比表面積が $19100\text{cm}^2/\text{g}$ であり、他の微粉末に比べて高比表面積であることから、初期材齢から SF のフィラー効果が発揮されたと考えられる。なお、長期材齢では SF のポゾラン反応が強度増加に寄与していると推察される。

一般に水硬性がないと考えられる LSP や Si 混合モルタルは、材齢 1 日では R0 と同程度の圧縮強度であるが、材齢 3 日から 91 日までは強度増加が確認された。LSP 混合モルタルを例にあげると、材齢 3 日において、置換率 20%で $9\text{N}/\text{mm}^2$ 、置換率 30%で $14\text{N}/\text{mm}^2$ の強度増加である。LSP や Si 混合モルタルにおける強度増加は、水硬性が主たる要因として説明できないため、微粉末の物理的作用が圧縮強度を増加させたと考えられる。本論文では、これをフィラー効果と定義する。

ポゾラン物質である FA 混合モルタルは、材齢 1 日では R0 と同程度の圧縮強

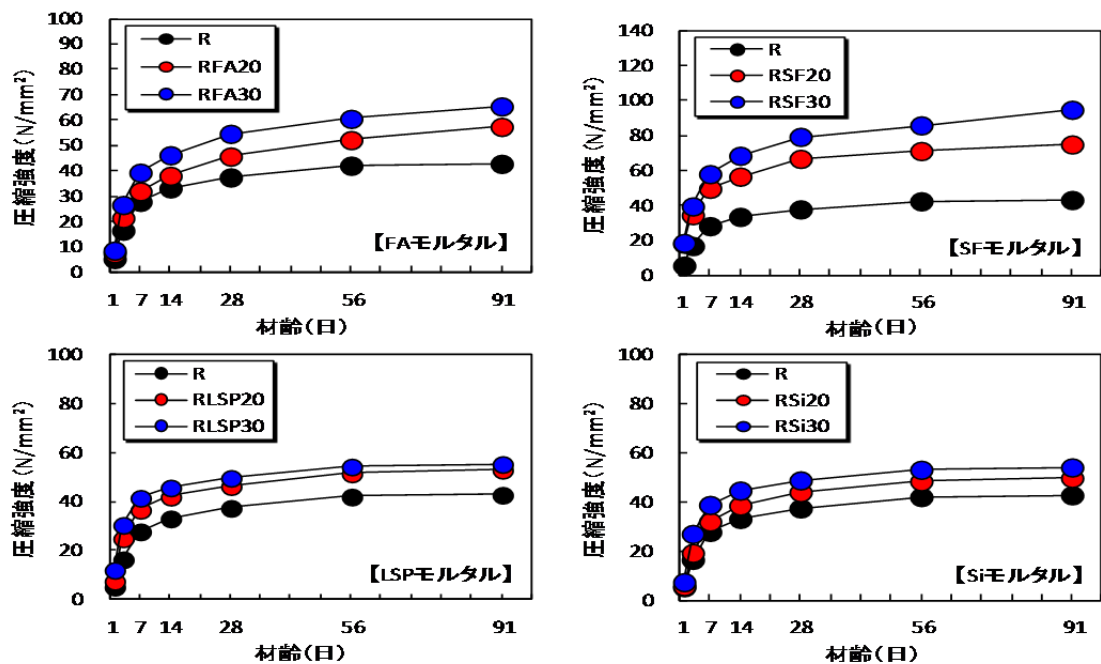


図-4-2 再生骨材モルタルの圧縮強度

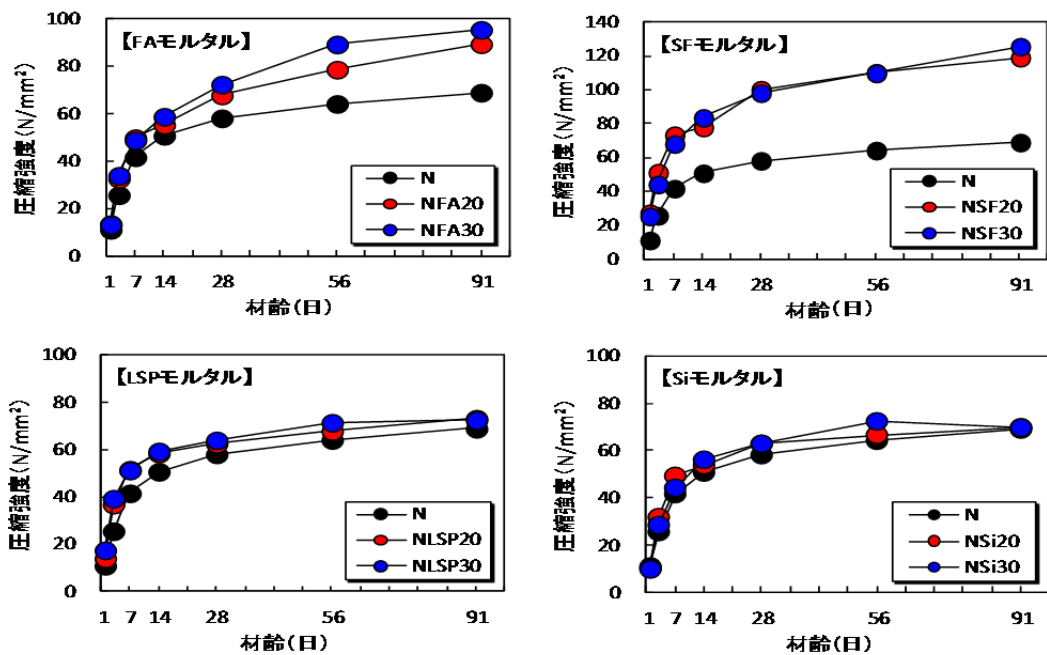


図-4-3 普通骨材モルタルの圧縮強度

度であり、材齢 3 日や 7 日において、LSP や Si 混合モルタルと同程度の圧縮強度を示した。一般に FA を外割混合した普通骨材コンクリートにおける FA のポズラン反応発生時期は、養生温度 20℃の環境下で材齢 28 日以降である^{注 4-6)}。一

方で、再生骨材モルタルでは、付着ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が FA とポゾラン反応を起こし、通常のポゾラン反応よりも早期になる可能性が考えられる。しかし、本実験では、FA 混合モルタルが LSP や Si 混合モルタルよりも高い圧縮強度を示した材齢は 91 日であり、早期ポゾラン反応による強度増加は確認されなかった。なお、材齢 91 日で LSP や Si 混合モルタルよりも高い圧縮強度となったのは、FA の通常のポゾラン反応によるものである。したがって、FA 混合モルタルは、材齢 3 日や 7 日においては LSP や Si 混合モルタルと同様に物理的作用であるフィラー効果によって圧縮強度が増加し、材齢 28 日以降では FA のポゾラン反応の影響が作用していると推察される。

普通骨材モルタル（図-4-3）においても、再生骨材モルタルと同様、SF 混合モルタルは全ての材齢で最も高い圧縮強度を示し、FA や LSP、Si 混合モルタルは材齢 3 日から基準配合 N0 に対して強度増加が確認された。内川ら⁷⁾は、骨材とペースト界面部分に直径 50nm 以上の粗大な空隙に富む遷移帯が形成され、コンクリートの強度に多大な影響を与えると述べている。さらに、普通骨材モルタルの遷移帯厚さの評価を行い、遷移帯は材齢 3 日頃より形成され、材齢 7 日前後でその厚さは最大になると報告している。つまり、FA や LSP、Si を外割混合したことによる強度増加は遷移帯の形成時期に一致し、フィラー効果が遷移帯に何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

また、ポゾラン物質ではない LSP や Si 混合モルタルは、材齢 3 日では強度増加が確認されたが、材齢 91 日では N0 と同程度の圧縮強度を示した。特に、比表面積が $6670\text{cm}^2/\text{g}$ という高比表面積の LSP であっても、材齢 28 日以降では圧縮強度がほとんど増加しなかった。同様の傾向は遠藤ら^{注4-8)}も報告している。これは、長期材齢になるとセメントの水和反応による強度発現が支配的となり、フィラー効果のような物理的作用による強度発現が顕著に現れなかったものと考えられる。一方で、再生骨材モルタル（図-4-2）では、LSP や Si 混合モルタルにおいても材齢 91 日まで R0 に対して強度増加が確認できることから、再生骨材モルタルに対するフィラー効果は、長期材齢でも効果的であるといえる。これは、N0 に対して R0 は、材齢 56 日から 91 日にかかる強度増進が小さいことから分かるように、再生骨材モルタルは長期強度の増進が小さい。再生骨材コンクリートにおいて、長期強度の増進が小さいことは、江口ら^{注4-9)}も報告している。このことによって、材齢 91 日のような長期材齢でもフィラー効果が強度発現に寄与したものと思われる。

4.3.2 強度増加率の相関

微粉末を外割混合したことによる基準配合からの強度増加率を以下の式[2]で算出し、再生骨材モルタルと普通骨材モルタルで比較検討を行った。

$$\text{強度増加率 (\%)} = (A - B) / B \times 100 \quad [2]$$

ここに A : 所定の材齢における微粉末混合モルタルの圧縮強度 (N/mm²)

B : 所定の材齢における微粉末無混合の基準配合の圧縮強度 (N/mm²)

図-4-4 と図-4-5 に同一材齢における強度増加率の相関を微粉末の種類ごとに示す。なお、フィラー効果が確認された材齢 3 日以降の結果を示した。図中に示す 45° の直線より上側に位置することは、微粉末による強度増加率が普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きいことを意味する。SF 混合モルタルに関しては、強度増加率の領域が異なるため、軸の値が異なるので注意が必要である。

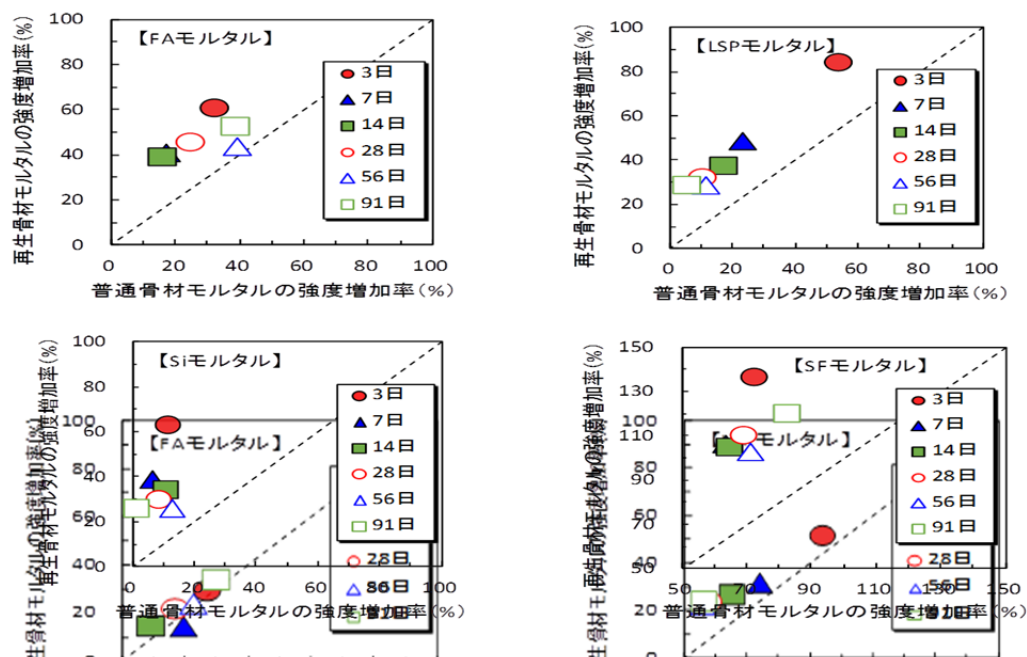


図-4-5 微粉末の種類ごとの同一材齢における強度増加率の相関（置換率 30%）

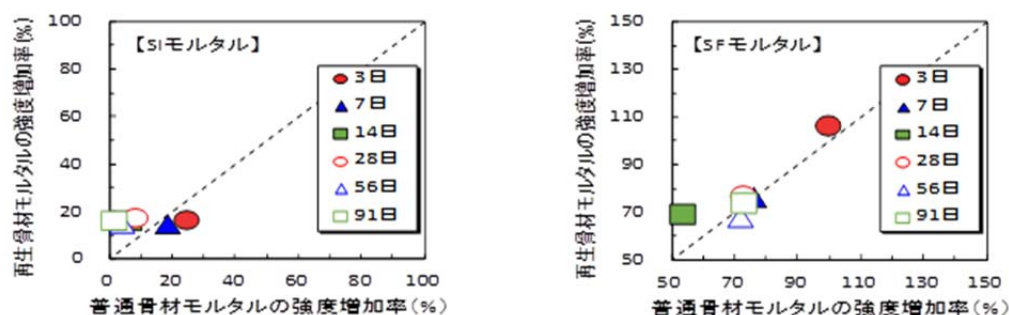


図-4-4 微粉末の種類ごとの同一材齢における強度増加率の相関（置換率 20%）

置換率 20%（図-4-4）、置換率 30%（図-4-5）共に、大半のデータが 45° の直線より上側に位置しており、微粉末を外割混合したことによる強度増加率は再生骨材モルタルの方が高いことが分かる。特に置換率 30%（図-4-5）ではこの傾向が顕著である。松下ら^{注4-5)}は、再生骨材モルタルの細孔構造の評価を行い、再生骨材から水分が滲出するため新ペースト部の細孔構造がポーラスになると報告している。つまり、本実験でも、再生骨材モルタルは普通骨材モルタルよりも新ペースト部がポーラスになっていると推察される。このことから、潜在的にポーラスな新ペースト部を有する再生骨材モルタルに対して、材齢 3 日程度の初期材齢から微粉末の物理的作用であるフィラー効果が効果的に働いたものと思われる。また、SF を除く 3 種類の微粉末は、比表面積が $1000\text{cm}^2/\text{g}$ から $6670\text{cm}^2/\text{g}$ の範囲であるが、同等の強度増加率を示した。このことから、本実験の範囲内では、微粉末の比表面積はフィラー効果に影響を与えないといえる。

4.3.3 示差熱重量分析

本実験で使用した再生細骨材には、質量割合で 37.2%の付着ペーストが存在する。したがって、再生骨材モルタルでは付着ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とポズラン物質がポズラン反応を起こす可能性がある。そこで、示差熱重量分析によりモルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を測定することでポズラン反応発生時期について検討を行った。

図-4-6 に再生骨材モルタル、図-4-7 に普通骨材モルタルの示差熱重量分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率測定結果を置換率ごとに示す。

再生骨材モルタルと普通骨材モルタルで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率に大差はないが、使用した再生細骨材と普通細骨材の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を測定したところ、再生細骨材は 2.2%であり、普通細骨材からは検出されなかった。また、示差熱重量分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は質量割合である。したがって、本実験では、細骨材や置換した微粉末によって単位質量中のセメント量が異なるため、含有率の絶対量は比較することができない。しかしながら、各種配合で材齢の進行に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$

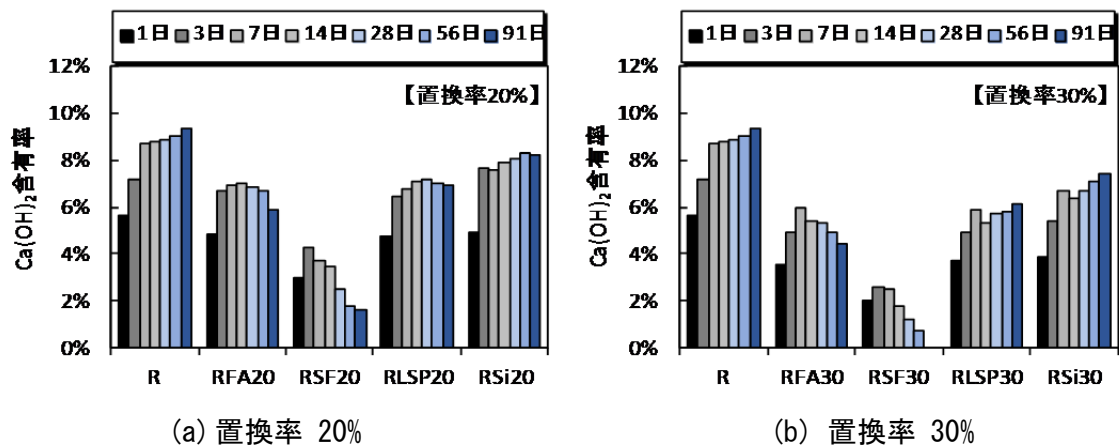


図-4-6 再生骨材モルタルの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率

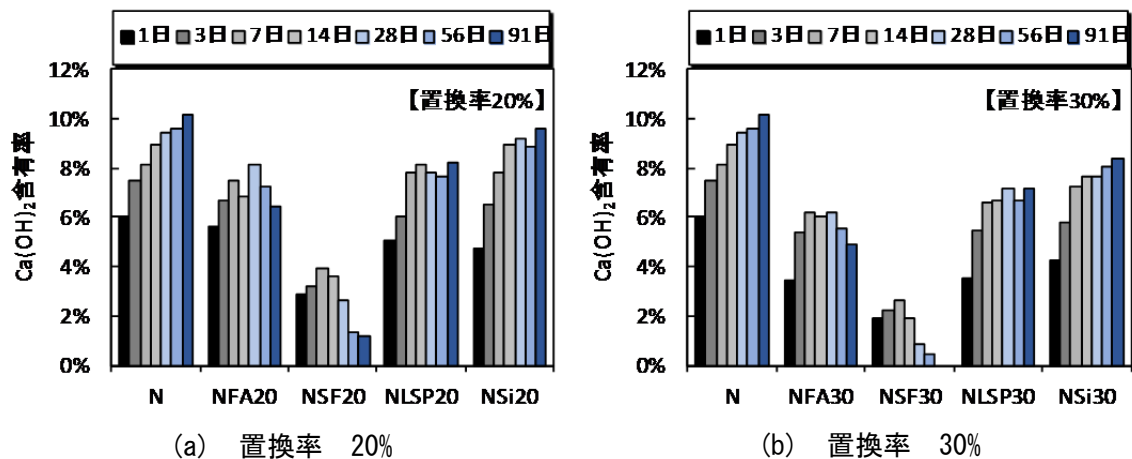


図-4-7 普通骨材モルタルの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率

含有率の増減の傾向を比較するには有効であるといえる。

一般に、材齢の進行に伴ってセメントの水和反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は増加する。本実験でも、再生骨材モルタルと普通骨材モルタル共に、ポゾラン物質である FA と SF 混合モルタルを除いて、材齢の進行に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の増加傾向が確認できる。

SF 混合モルタルは、再生骨材モルタル（図-4-6）では材齢 3 日、普通骨材モルタル（図-4-7）では材齢 7 日に最大値を示し $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率が減少していることが分かる。これは、SF のマイクロファイラー効果によって水和反応が促進され、それに伴って生成された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と SF が材齢初期からポゾラン反応を起こしたためであると推察される。また、再生骨材モルタルが普通骨材モルタルよりも早期に減少傾向を示したのは、再生骨材の付着ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響であ

ると考えられる。

FA 混合モルタルは、材齢 1 日から 7 日にかけては $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の減少は確認できない。

このことから、材齢 3 日程度の初期強度の増加に対して FA のポゾラン反応のような化学的作用は寄与しておらず、物理的作用が寄与していると推察できる。一方、再生骨材モルタルの置換率 20% (図-4-6(a)) では材齢 14 日、置換率 30% (図-4-6(b)) では材齢 7 日のような、材齢 28 日以前に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率が最大値を示し、減少していることが分かる。なお、普通骨材モルタル(図-4-7(a)、(b))における FA 混合モルタルは、材齢 28 日に最大値を示し減少しており、ポゾラン反応発生時期に対する従来の知見^{注4-6)}と一致した結果が得られた。このことから、再生骨材モルタルでは、付着ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響を受けて、普通骨材モルタルよりも早期に FA のポゾラン反応が生起していると推察される。ただし、反応初期であり、本実験の範囲では、圧縮強度に与える影響は小さかった。

4.3.4 細孔径分布

材齢 3 日から確認された微粉末を外割混合したことによる圧縮強度の増加には、微粉末の物理的作用であるフィラー効果が寄与していることが明らかになった。また、フィラー効果は、再生骨材モルタルの方が高い寄与率を示した。そこで、置換率 20%の配合に関して細孔径分布の測定を行い、総細孔空隙量に着目してフィラー効果のメカニズムに関して検討を行った。

図-4-8 に再生骨材モルタル、図-4-9 に普通骨材モルタルの総細孔空隙量と材

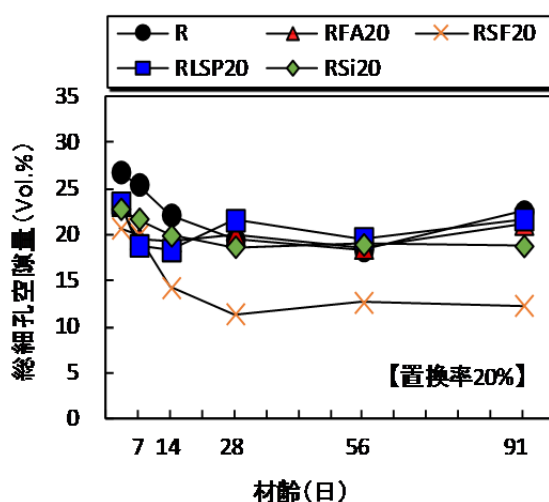


図-4-8 材齢に伴う再生骨材モルタルの総細孔空隙量の変化

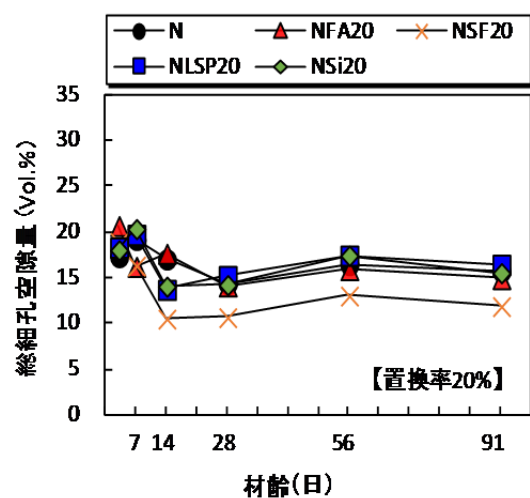


図-4-9 材齢に伴う普通骨材モルタルの総細孔空隙量の変化

齢の関係を示す。再生骨材モルタル（図-4-8）は普通骨材モルタル（図-4-9）に比べて材齢 1 日から 91 日の全ての材齢で高い総細孔空隙量を示した。これは、再生細骨材自体が付着ペーストの存在によってポーラスな細孔組織になっていることに起因すると推察される。再生骨材モルタルの圧縮強度が普通骨材モルタルよりも低強度になる要因の一つであると考えられる。

また、再生骨材モルタル（図-4-8）において、フィラー効果による強度増加が確認された材齢 3 日から 91 日にかけて、微粉末を外割混合した 4 配合は、基準配合 R0 に対して総細孔空隙量が小さくなった。特に、ポゾラン活性や水硬性がない LSP や Si を混合したモルタルでも総細孔空隙量の減少が確認された。同様な傾向は普通骨材モルタル（図-4-9）でも確認できる。このことから、微粉末を外割混合したことで、ポーラスなセメントペースト部を微粉末が充填し、緻密化することによって圧縮強度が増加したと考えられる。ここで、材齢 3 日における総細孔空隙量を図-4-10（再生骨材モルタル）及び図-4-11（普通骨材モルタル）に示す。微粉末を外割混合したことによる総細孔空隙量の減少は、再生骨材モルタル（図-4-10）の方が顕著である。

確認された材齢 3 日から 91 日にかけて、微粉末を外割混合した 4 配合は、基準配合 R0 に対して総細孔空隙量が小さくなった。特に、ポゾラン活性や水硬性がない LSP や Si を混合したモルタルでも総細孔空隙量の減少が確認された。同様な傾向は普通骨材モルタル（図-4-9）でも確認できる。このことから、微粉末を外割混合したことで、ポーラスなセメントペースト部を微粉末が充填し、緻密化することによって圧縮強度が増加したと考えられる。

ここで、材齢 3 日における総細孔空隙量を図-4-10（再生骨材モルタル）及び図-4-11（普通骨材モルタル）に示す。微粉末を外割混合したことによる総細孔空隙量の減少は、再生骨材モルタル（図-4-10）の方が顕著である。再生骨材モ

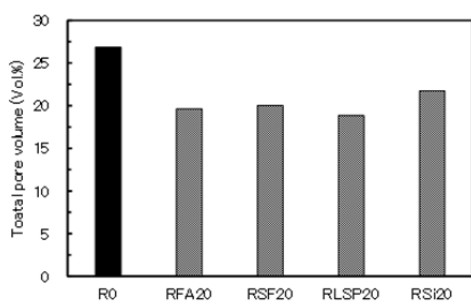


図-4-10 材齢3日の再生骨材モルタルの総細孔空隙量

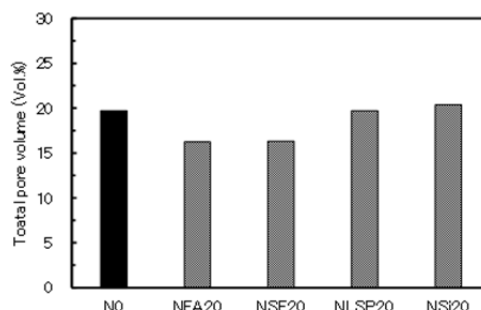


図-4-11 材齢 3 日の普通骨材モルタルの総細孔空隙量

ルタルの強度増加率の値が普通骨材モルタルよりも高くなったのは、再生骨材モルタルの細孔組織がポーラスであり、フィラー効果が効果的に働いたためであるといえる。なお、材齢 1 日では、総細孔空隙量の減少は確認されなかった。フィラー効果のような物理的作用は、フレッシュ時に近い材齢から働いていると推察される。しかしながら、材齢 1 日のような初期材齢では、フィラー効果によるモルタル硬化体の緻密化を、細孔径分布では明確に捉えることができなかったと考えられる。

4.4 第 4 章のまとめ

第 4 章では、産業副産物由来の材料である再生骨材及びフライアッシュの利用並びに用途拡大を目的に、フライアッシュを細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現性状に関して検討した。特に、初期材齢の強度増加に寄与するフィラー効果について、フライアッシュを含む 4 種類の鉱物質微粉末を用いることで実験的検討を行った。この章の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水硬性がない鉱物質微粉末であっても、再生細骨材の一部に混合することで材齢 3 日程度の初期材齢から無混合の再生骨材モルタルに対して圧縮強度が増加する。これは、微粉末の物理的作用であるフィラー効果によるものである。また、フィラー効果は、再生骨材モルタルに対しては材齢 91 日の長期材齢まで維持するが、普通骨材モルタルでは材齢 91 日でその効果はなくなる。
- (2) フィラー効果による強度増加率は普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きい。これは、普通骨材モルタルよりもポーラスな新セメントペースト部を有する再生骨材モルタルに対して、微粉末の物理的作用であるフィラー効果が効果的に働いたためと考えられる。
- (3) 示差熱重量分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の測定結果から、再生骨材モルタルに対するフライアッシュのポゾラン反応は、普通骨材モルタルよりも早期に起こる可能性が示唆された。これは、再生細骨材の付着ペースト中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響であると考えられる。ただし、反応初期であり、圧縮強度に与える影響は小さい。
- (4) 細孔径分布の測定結果から、微粉末を再生細骨材の一部に混合したことで、材齢 3 日のような初期材齢から総細孔空隙量が減少した。これは、微粉末の物理的作用であるフィラー効果によって、ポーラスなセメントペースト部を充填したことに起因すると推察される。

参考文献：

- 4-1 橋本親典ほか：フライアッシュモルタルの早期強度発現に影響を及ぼす再生骨材に関する実験的検討, 第 40 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集(論文), pp. 15-20 (2013)
- 4-2 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第 85 号, pp. 15-45 (1962)
- 4-3 陶山裕樹ほか：各種粉体を外割混合したコンクリートにおける細孔組織を考慮した圧縮強度に関する検討, コンクリート工学論文集, 第 24 巻, 第 3 号, pp. 89-99 (2013)
- 4-4 例えば高巢幸二, 松藤泰典：再生骨材を使用したフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 2, pp. 379-384 (2007)
- 4-5 松下博通, 佐川康貴, 川端雄一郎：再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 1, pp. 230-242 (2006)
- 4-6 小早川真ほか：フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No. 2, pp. 739-744 (1998)
- 4-7 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第 4 巻, 第 2 号, pp. 1-8 (1993)
- 4-8 遠藤崇司, 山本康彦：モルタルの強度発現に及ぼす鉱物質微粉末の影響に関する研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会第 V 部門, pp. 325-326 (2003)
- 4-9 江口正晃ほか：廃品ボールを原コンクリートとする全量再生骨材コンクリートの硬化特性に関する基礎的研究：コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1783-1788 (2009)

第5章 結 語

コンクリート業界においても、エコ・リサイクルが重要視されはじめた。また、地球温暖化対策として炭酸ガス排出削減への取り組みも検討しなければならない。そのコンクリートを構成している材料の7割は、石材である砂利と砂である。天然資源に頼っていた細・粗骨材の採取不可能により、これらコンクリート中の石材の再利用と、石炭火力発電により大量に副産物として排出されているフライアッシュの利用に着目したのが本論文である。

再生骨材とその再生骨材を使用したコンクリートおよびフライアッシュにはJIS規格が厳しく決められている。

本実験で使用した再生骨材は、電柱に使用していた廃コンクリートポールを破碎・分級した再生細骨材とフライアッシュを細骨材の1/3という多量に置換したモルタル供試体を作成し、さらに再生骨材微粉末とか、試薬水酸化カルシウム・純粋な二酸化ケイ素、フライアッシュ4種類をセメント内割3%、5%、10%を混入し、圧縮強度試験・示差熱重量分析を行った。3章での考察は、材齢3日から28日までの初期材齢において、ポゾラン反応は示差熱重量分析で水酸化カルシウムの質量割合での減少という結果で明確に確認できたが、そのポゾラン反応による初期材齢での強度増加は確認出来なかった。しかし、フィラー効果については、比表面積の小さい二酸化ケイ素を除いて、著しい結果が確認された。セメント粒子より大きい二酸化ケイ素は、セメントペーストと再生骨材とのポーラスな境界面を充填することが出来なかったものと思われる。他の鉱物質微粉末によるフィラー効果は、W/Cが大きい低強度モルタルほど大きくなった。フライアッシュ混入モルタルのフィラー効果およびポゾラン反応による強度増加率は、同配合の普通骨材モルタルよりも大きかった。再生骨材とフライアッシュの相性の良さが確認された。

後半では、鉱物質微粉末を細骨材の一部に混合した再生骨材モルタルの強度発現メカニズムについて考察した。微粉末に水硬性がない場合でも材齢初期から圧縮強度が増加するという報告が数点見られるが、粉体を外割混合したコンクリートの初期強度発現メカニズムに関しては不明な点が多い。また、これまでは普通骨材コンクリートを対象にして、再生骨材コンクリートへの報告例は少ない。本章では、材齢3日から28日までの初期材齢強度増加の要因をフィラー効果と定義し、水硬性の無い各種鉱物質微粉末を用いることで、再生骨材コンクリートの初期強度増加に寄与するフィラー効果のメカニズムに関して考察した。各種微粉末を再生細骨材の一部と置換し、混合することで材齢3日程度の初期材齢から無混合の再生骨材モルタルに対して圧縮強度が増加した。これは、微粉末の物理的作用であるフィラー効果によるものである。フィラー効果によ

る強度増加率は普通骨材モルタルよりも再生骨材モルタルのほうが大きい。これは、ポーラスな新セメントペースト部を有する再生骨材モルタルに対して、微粉末の物理的作用であるフィラー効果が効果的に働いたためと考えられる。細孔径分布の測定結果から、微粉末を再生細骨材の一部に混合したことで、材齢3日の初期材齢から総細孔空隙量が減少した。これは、微粉末の物理的作用であるフィラー効果によって、ポーラスなセメントペースト部を充填したことに起因すると推察される。

示差熱分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の測定結果から、再生骨材モルタルに対するフライアッシュのポゾラン反応は、普通骨材モルタルよりも早期に起こる可能性が示唆された。これは、再生細骨材の付着ペーストの中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響であると考えられる。ただし、反応初期であり、圧縮強度に与える影響は小さい。

謝辞

今(西暦 2016 年、平成 28 年)からおおよそ 8 年前、香川大学大学院経済学研究科と一緒に修了した平塚和男博士の紹介で、徳島大学大学院の橋本親典教授にお会いした。

教授の言では、たとえ修士号取得であっても「科目」が異なるので、入学は難しい。しかし、研究生として研鑽を積みれば別である、との指導であった。

研究生として約 2 年、橋本教授の許可を得て入学できた。

本論文は、徳島大学大学院橋本親典教授の指導のもと、筆者が在学期間中に行った研究の成果を取りまとめたものである。

橋本教授には、本研究の遂行にあたり、入学時よりすでに大きな「テーマ」を与えてくださり、迷うことなく安心のスタートでした。

本研究の一部分に「示差熱分析」があった。機器の取り扱い不十分のため、2 度にわたり大きな迷惑をかけた。しかし、橋本教授は、10 時間を超える「示差熱分析」中、早朝・深夜にもかかわらず何度も実験室に来て指導して頂いた。またある時、提出論文の修正・校正に、連続 23 時間もの時間をかけて頂いたこともあった。

本論文の審査にあたり、上田隆雄教授、上月康則教授には、多大な労をおかけしましたことを深く感謝申し上げます。

建設創造システム工学の近藤光男教授、人間工学の吉田敦也教授、社会科学の横畠・近藤教授、科学技術論の田中一郎教授、ビジネスモデル特論の山中英生教授、地盤環境制御工学の上野勝利教授、流体制御材料特論の橋本親典教授、都市システム設計特論の山中・滑川達教授、社会基盤材料特論の上田隆雄教授、政策シミュレーション特論の近藤光男教授には科目履修に際して、大変お世話になりました。

研究する過程では、いつも渡辺健准教授の指導を仰ぎました。

石丸啓輔技官には、研究に関する多くのアドバイスの他に、実験に関しても多くの実技指導をしていただきました。

コンクリート研究室の皆さまには、長年にわたり幾度も「パソコン」の指導を頂きましたことを感謝いたします。

最後になりましたが、わたくしの家族・そのほかご縁の方々の支援によって学業がまっとうできましたことを深く感謝いたします。

平成 28 年 8 月 青井洋視